# ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO

ORGANIZADORES
ALINE MARA OLIVEIRA
OSVALDO SENA GUIMARÃES

VOLUME 17

Editora Poisson

Aline Mara Oliveira
Osvaldo Sena Guimarães
(Organizadores)

# Engenharia, Gestão e Inovação
# Volume 17

1ª Edição

Belo Horizonte
Editora Poisson
2024

**Editor Chefe:** Dr. Darly Fernando Andrade

**Conselho Editorial**
Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
MSc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57

Engenharia, Gestão e Inovação - Volume 17/ Organizadores:Aline Mara Oliveira,Osvaldo Sena Guimarães - Belo Horizonte - MG: Editora Poisson, 2024

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-467-3
DOI: 10.36229/978-65-5866-467-3

Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Educação. I. OLIVEIRA, Aline Mara II. GUIMARÃES,Osvaldo Sena III. Título.

CDD-620

Sônia Márcia Soares de Moura - CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterado.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

# SUMÁRIO

**Capítulo 1:** Computação Quântica: um estudo comparativo e informativo entre a aplicação do Silício e Nióbio ..... 06

Gabriel Saquete dos Santos, Eduardo Sousa Soares, Antonio Sérgio Brejão

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-467-3.CAP.01

**Capítulo 2:** Projeto de colunas de flotação: aplicação em processamento de minérios ..... 21

Marco Aurélio Cremasco, Alessandra Suzin Bertan

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-467-3.CAP.02

**Capítulo 3:** Estudo da influência de adição de cobre e temperatura de sinterização em aço inoxidável ferrítico 430L obtido via metalurgia do pó convencional ..... 32

Cesar Henrique Rocha Silveira, Rafael Menezes Nunes

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-467-3.CAP.03

**Capítulo 4:** Desenvolvimento de um dispositivo portátil para auxílio a deficientes visuais com detecção ultrassônica de obstáculos ..... 52

Anderson de Oliveira Castro Correia, Cláudio Júnior Neves Sousa, Rafael de Paula Lacerda Pio

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-467-3.CAP.04

**Capítulo 5:** Aplicação de ferramentas *Lean Manufacturing* na redução de perdas em processos produtivos metalúrgicos ..... 61

Renan Lima Cagliari, Diego José Casagrande

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-467-3.CAP.05

**Capítulo 6:** Análise de sistema de medição em R: estudo exploratório do pacote *SixSigma* ..... 71

Olga Maria Formigoni Carvalho Walter, Elisa Henning, Leandro Zvirtes

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-467-3.CAP.06

**Capítulo 7:** Biorrefinarias em estações de tratamento de esgoto para o desenvolvimento sustentado no setor de saneamento ..... 88

Mauro Donizeti Berni, Paulo Cesar Manduca

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-467-3.CAP.07

# SUMÁRIO

**Capítulo 8:** Utilização das cartas de controle da média e da amplitude para monitorar o comprimento de eixos de comando em três máquinas em um processo produtivo.... 94

Jean de Lima Soares, Guilherme Donatto Amaro, João Ercio Miranda Júnior, Karen Cristina Ribeiro Sarandy, Nilo Antonio de Souza Sampaio

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-467-3.CAP.08

**Capítulo 9:** Mapeamento de processos de negócio em um distribuidor de produtos e componentes de fluido industrial ..... 104

Luciano Trentin, Moacir Marques

**DOI:** 10.36229/978-65-5866-467-3.CAP.09

**Autores** ..... 122

# Capítulo 1

## *Computação Quântica: um estudo comparativo e informativo entre a aplicação do Silício e Nióbio*

*Gabriel Saquete dos Santos*
*Eduardo Sousa Soares*
*Antonio Sérgio Brejão*

Resumo: Entre os anos de 2020 e 2022 houve uma escassez de semicondutores devido à crise mundial em decorrência da pandemia do COVID-19, que declarou uma grande demanda por semicondutores nesse período, sendo um deles, na produção de computadores. A busca crescente por semicondutores mais eficientes tem estimulado a exploração de novos materiais, e o Nióbio emerge como um candidato promissor nesse contexto. Atualmente há experimentos com semicondutores à base de Nióbio que confirmam sua alta eficiência em comparação ao Silício. Este artigo tem como objetivo realizar um estudo informativo referente às características do Nióbio e suas aplicações em um computador quântico, além de compará-lo ao Silício, se tratando da eficiência como material base para componentes eletrônicos. No desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados artigos relacionados ao Nióbio, Silício e computador quântico. Com avanços na tecnologia, computadores mais rápidos são necessários, fazendo com que as pesquisas sobre o uso do Nióbio em componentes eletrônicos, especialmente nas Junções de Josephson, se tornem mais frequentes, demonstrando suas vantagens nos experimentos realizados nos últimos anos e até em sua aplicação para circuitos em computadores quânticos. Entretanto, esta área ainda carece de estudos.

Palavras-chave: computador quântico, junções de josephson, nióbio, semicondutores, silício.

## 1. INTRODUÇÃO

As atuais questões econômicas globais pós-pandemia de COVID-19 demonstram a fragilidade de alguns setores produtivos. Um dos segmentos, é a produção de semicondutores, também conhecido como *chip,* que se bem estruturado como setor estratégico, pode dar oportunidades para as empresas serem mais competitivas.

Para ser competitiva, a empresa requer planejamento em P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) em novos processos de fabricação e outros fatores que são de extrema importância para que este desenvolvimento ocorra, sendo estes: estudo em novas tecnologias; mão de obra qualificada; eficiência; rentabilidade; investimentos, que devem ser aplicadas desde o início das cadeias produtivas, também denominadas de cadeias primárias, como exemplo, a extração de Silício e do Nióbio.

No Brasil, o avanço de novos paradigmas de produção, políticas macroeconômicas e a crescente influência das tecnologias estão promovendo uma maior especialização nas indústrias do setor eletrônico, resultando em um significativo aumento do valor agregado tanto aos produtos quanto aos processos de fabricação.

O aumento desses processos e projetos melhorados, bem definidos e estrategicamente produtivos pode proporcionar maior competitividade para o país perante a nova economia global. As economias globais estão liderando a indústria produtiva de semicondutores com significativa produção, vendas e geração de empregos.

A crescente busca por desenvolvimento de semicondutores que desempenhem a função de componentes eletrônicos com maior eficiência trouxe a necessidade de novos materiais, como no caso, o Nióbio. Quando se fala de novas tecnologias atualmente, segundo a SIA - Semiconductor Industry Association, Semiconductor Demand Drivers, (2021 e 2022), constataram que no ano de 2020 e 2021, os computadores foram os itens com maior demanda para o produto final dos semicondutores, mostrando que cada vez mais, há a necessidade de trazer novas tecnologias. Algumas dessas tecnologias, que estão sendo estudadas, são os computadores quânticos, que ainda estão em desenvolvimento, pois, os materiais utilizados para construir os componentes eletrônicos que são utilizados para um melhor processamento ainda são a base de Silício, porém, este cenário está mudando com a utilização do Nióbio.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. SILÍCIO

O Silício (Si) é um componente químico que possui um número atômico igual a 14 e uma massa atômica de 28u (Schleier, Galitesi e Ferreira, 2014).

Essa matéria está muito presente no universo e constitui cerca de 27,7% da crosta terrestre. Ele apresenta algumas características, tais como: é um sólido duro de coloração cinza escuro, possui um brilho metálico, estrutura cristalina próxima à do diamante e reações químicas similares às do carbono (Peixoto, 2001).

O Silício é utilizado em diversas aplicações. Atualmente, é altamente empregado na fabricação de vidros, cerâmicas, componentes eletrônicos, dentre outros (Schleier, Galitesi e Ferreira, 2014).

## 2.2. NIÓBIO

O Nióbio é um elemento químico composto por 41 prótons, pertencendo à classe dos metais de transição do grupo 5 da tabela periódica (Bruziquesi et al., 2019). Suas características são: sólido metálico; macio; dúctil; elevado ponto de fusão; alta resistência à corrosão devido a ter uma película superficial de óxido, chamada de camada de passivação (Sousa, Fernandes e Guerra, 2013). Ele possui inúmeras aplicações, como por exemplo: carros; estruturas de edifícios; pontes; turbinas de avião; aparelhos de ressonância magnética; marcapassos; sondas espaciais; foguetes; tubulações de gás; componentes eletrônicos; baterias. A sua produção envolve mais de 160 etapas de características químicas e metalúrgicas. O Nióbio é produzido a partir de minérios abundantes na crosta terrestre, como o pirocloro e a columbita-tantalita (CBMM, 2021).

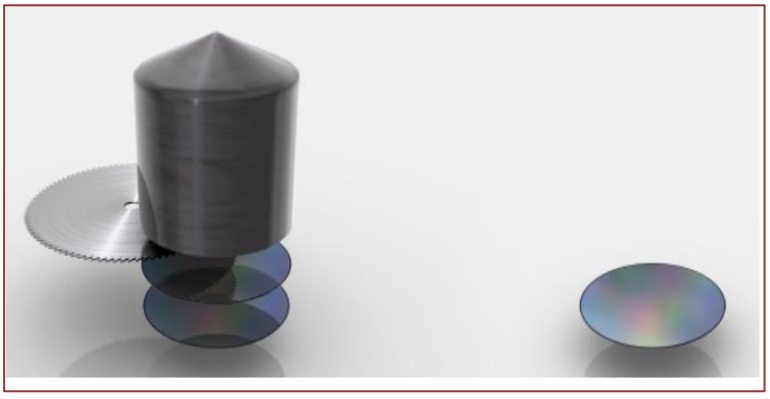
## 2.3. SEMICONDUTORES

Os condutores e os isolantes são materiais formados por átomos que possuem elétrons na sua camada de valência. No caso dos condutores, os elétrons são facilmente desprendidos da sua órbita, tornando fácil a locomoção deles quando aplicado uma diferença de potencial. Se tratando dos isolantes ocorre o contrário, os elétrons dificilmente são retirados da sua órbita, prejudicando a locomoção deles quando aplicado uma diferença de potencial (Cruz e Junior, 2009).

Os semicondutores são materiais onde as suas propriedades elétricas estão entre as dos condutores e as dos isolantes (Malvino e Bates, 2016). Porém, um material semicondutor puro tem características de um isolante, sendo necessário realizar a dopagem, que corresponde na adição de outros materiais (chamados de impurezas) com características diferentes. Desta forma, após a dopagem o material passa a possuir elétrons livres ou lacunas (Silva et al., 2018).

Sedra et al., 2000 p.1152, salientam que atualmente, os CI's (Circuitos integrados) utilizam-se do Silício com alto grau de pureza. O material é crescido como um cristal na forma de tarugo. Ele forma um cilindro sólido de 10 a 30 cm de diâmetro por 1 metro de comprimento e sua cor é cinza metálica. Esse cristal é, então cortado para que sejam produzidas lâminas de 10 a 30 cm de diâmetro com espessura de 400µm a 600µm, em seguida a lâmina é polida até ficar com acabamento de um espelho, como demonstrado na Figura 1.

**Figura 1:** Cilindro e Lâmina de Silício



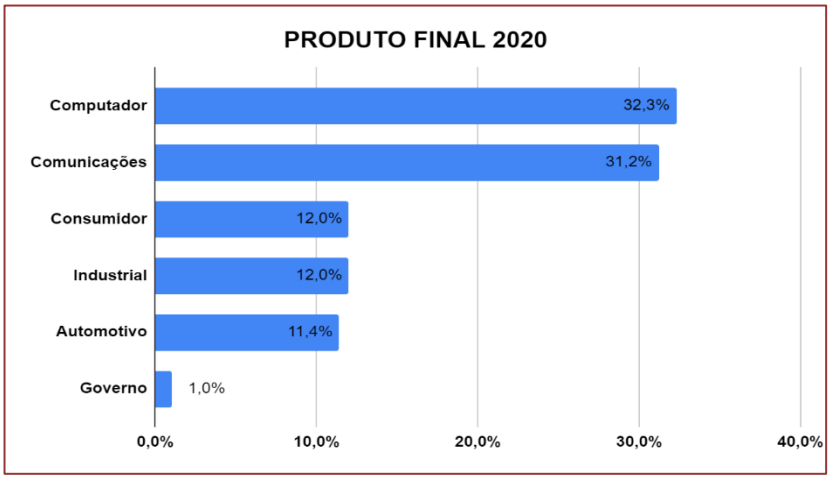
Fonte: Piropo, 2012.

## 2.4. CRISE MUNDIAL DE SEMICONDUTORES

Segundo a revista SIA - Semiconductor Industry Association (2021), a escassez dos semicondutores em 2020 foi causada principalmente pela oscilação na demanda durante a pandemia de COVID-19. A indústria enfrentou muitos desafios para atender à procura em diversos setores. Desta forma, quando se fala no contexto nacional, o semicondutor foi um artifício essencial para a recuperação da economia mundial. Fazendo com que possibilitasse todos os meios necessários para que a sociedades não parasse, como exibição (aulas *online*, telemedicina, *home office*, etc.), conectividade sem fio, processamento e armazenamento para vários segmentos, incluindo, saúde, telecomunicações, energia, finanças, transporte, agricultura, entre outros.

Na Figura 2, observa-se que o item com maior demanda para utilização de semicondutores em 2020 foi o computador.

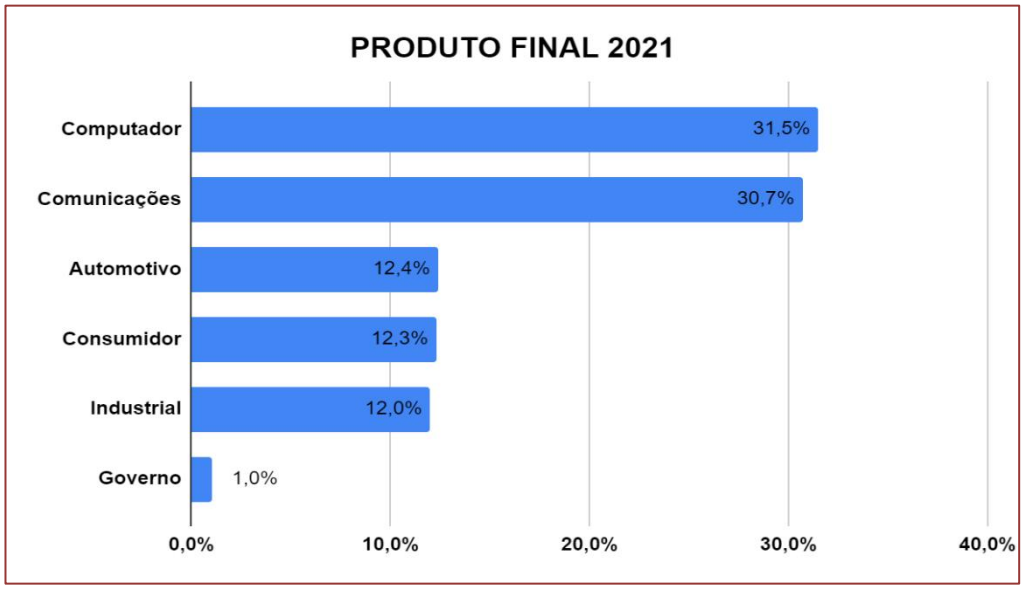
**Figura 2:** Demanda para uso dos semicondutores em 2020




Fonte: SIA - Semiconductor Industry Association, Semiconductor Demand Drivers, 2021 (Adaptado).

No ano de 2021, o computador permanece sendo o item com maior demanda para utilização de semicondutores, como mostrado na Figura 3.

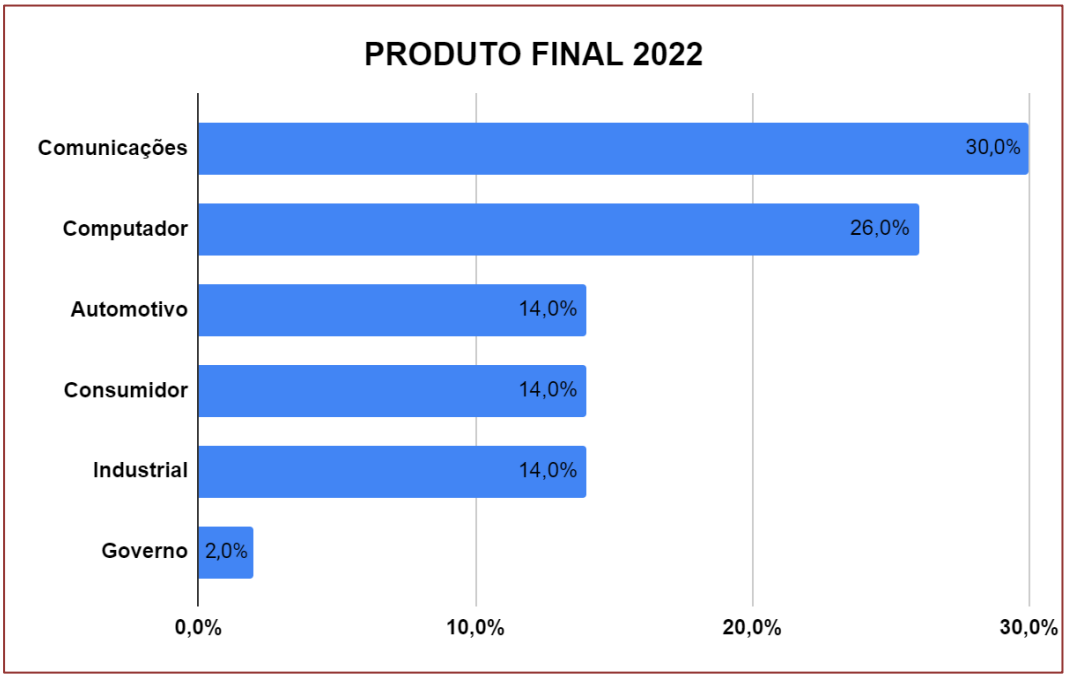
**Figura 3:** Demanda para uso dos semicondutores em 2021




Fonte: SIA - Semiconductor Industry Association, Semiconductor Demand Drivers, 2022 (Adaptado).

Em contraste ao ano de 2020 e 2021, o ano de 2022 é caracterizado por ter itens de comunicação com a maior demanda para utilização de semicondutores, como mostrado na Figura 4.

**Figura 4:** Demanda para uso dos semicondutores em 2022

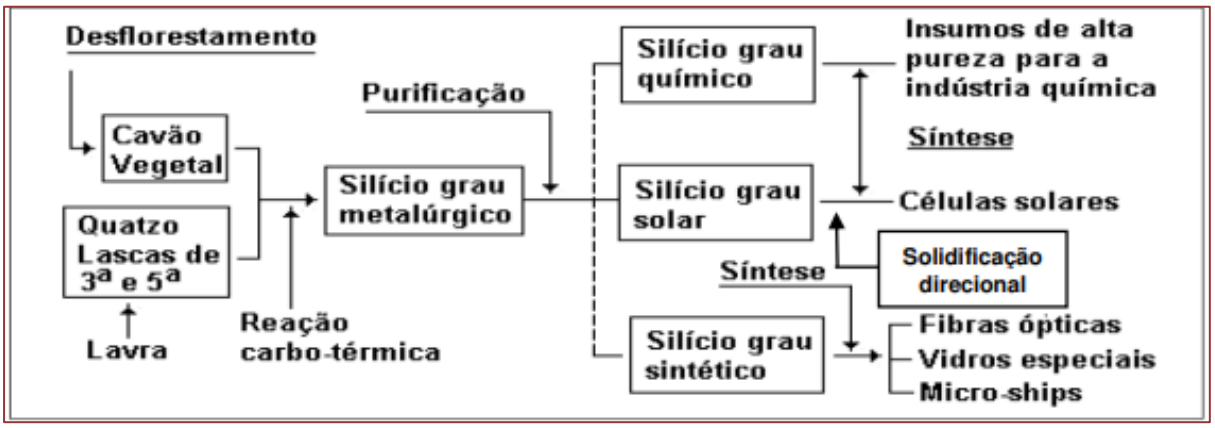



Fonte: SIA - Semiconductor Industry Association, Semiconductor Demand Drivers, 2023 (Adaptado).

## 2.5. CADEIA PRODUTIVA DOS SEMICONDUTORES E CHIP

Na Figura 5 é possível identificar a representação do processo de fabricação do Silício em todos os graus, o que é importante para entender quais são as etapas para chegar ao chip ou semicondutor.

**Figura 5:** Rota de processamento das lascas de quartzo para obtenção do Silício grau solar



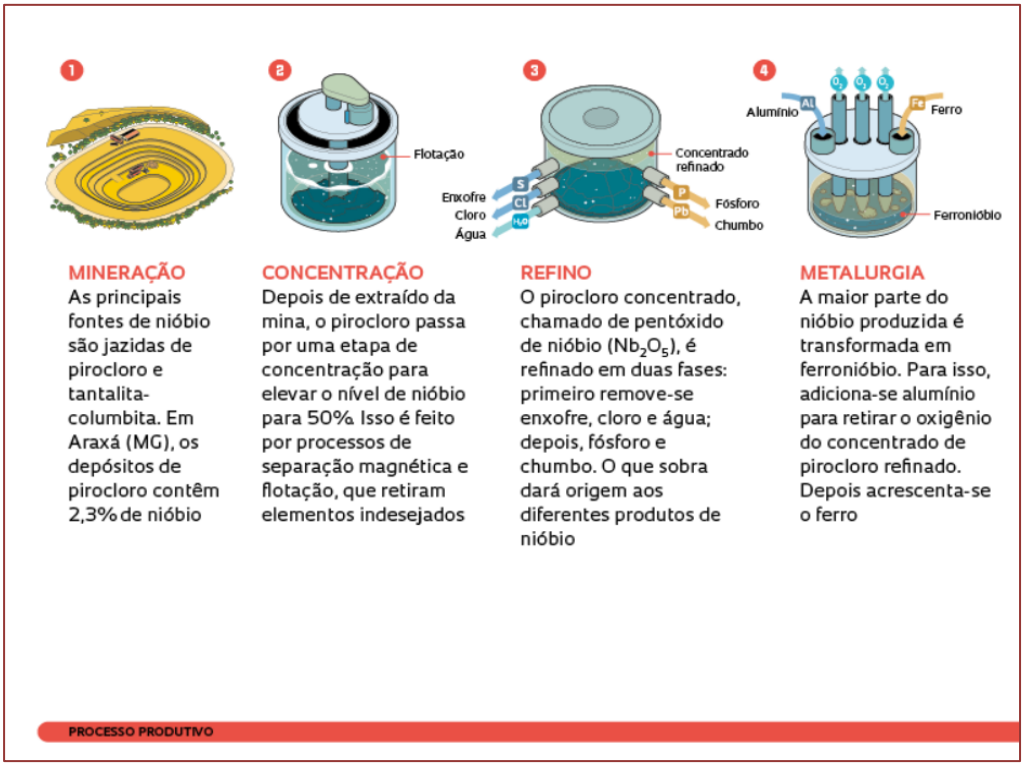

Fonte: Guzzo, 2008.

## 2.6. CADEIA PRODUTIVA DO NIÓBIO ATÉ O SUBPRODUTO PARA FABRICAÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS

O Nióbio não é um minério retirado diretamente da natureza, ele passa por diversos processos, primeiro sendo extraído do pirocloro como Nb2O5 (Óxido de Nióbio), que é o material utilizado para a fabricação de componentes eletrônicos (Lima, 2010).

A Figura 6A e 6B demonstram o processo de extração do pirocloro e tantalita-columbita até o refino que dá origem aos diferentes materiais à base de Nióbio, que em sua maioria, será utilizado como Ferro-Nióbio.

**Figura 6A:** Processo de extração dos subprodutos do Nióbio



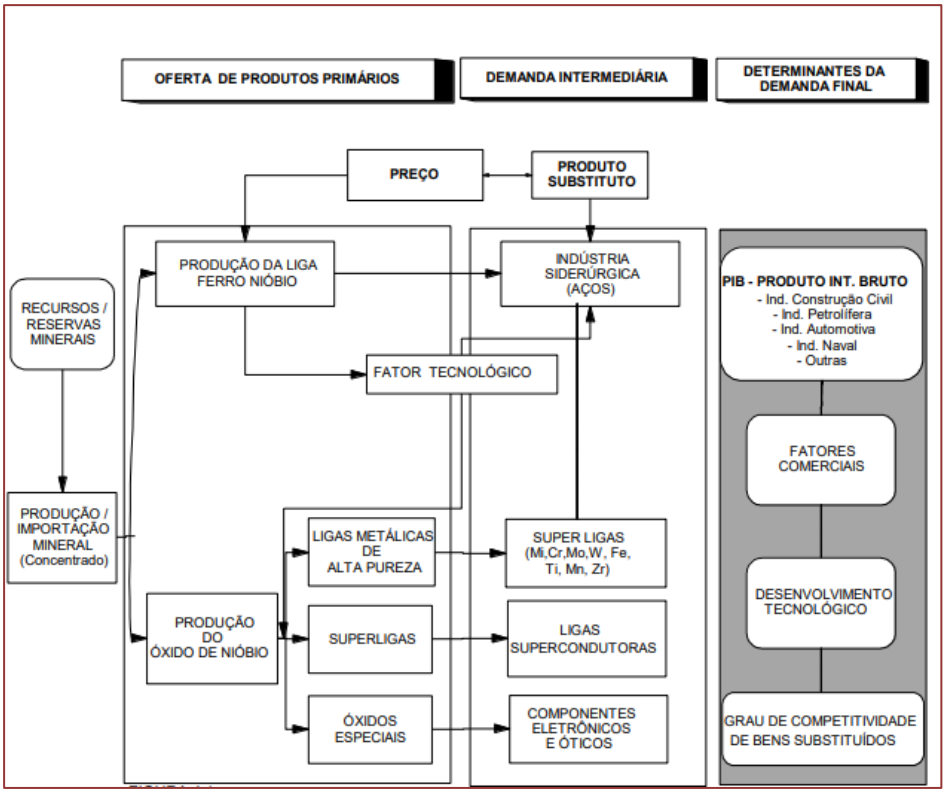

Fonte: Vasconcelos e Chaves, 2019.

**Figura 6B:** Distribuições comerciais do Nióbio

Fonte: Vasconcelos e Chaves, 2019.

Na Figura 7, é possível observar a representação do diagrama de blocos mostrando os direcionamentos do Nióbio no mercado.

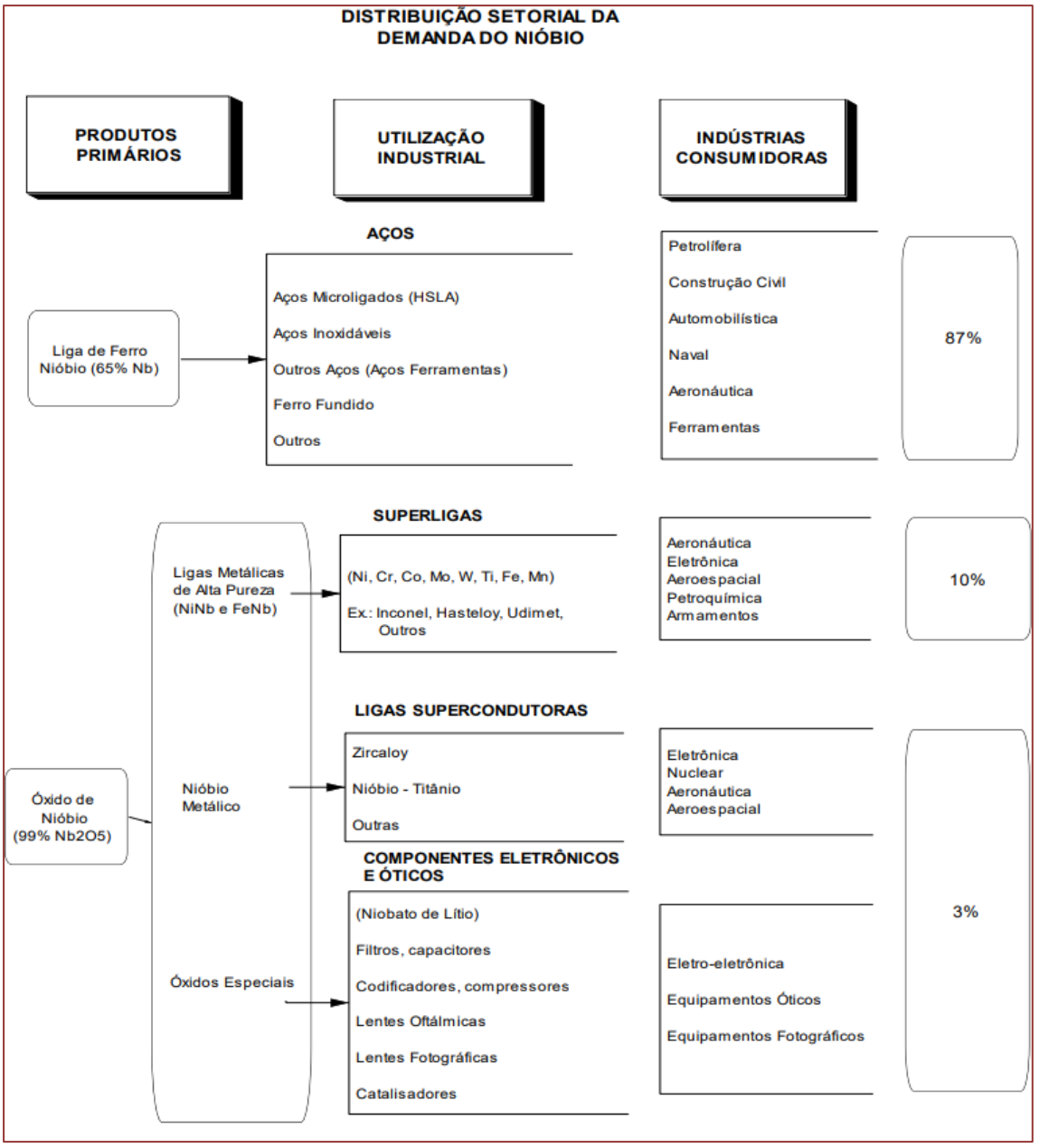
**Figura 7:** Estrutura de Mercado do Nióbio




Fonte: Lima, 2010.

Na Figura 8, verifica-se uma representação de como o Nióbio é distribuído pelos setores industriais e quais são os seus destinos finais.

**Figura 8:** Distribuição setorial da demanda do Nióbio




Fonte: Lima, 2010.

## 2.7. VANTAGENS DA APLICAÇÃO DO NIÓBIO NA ELETRÔNICA

Assim, para Sousa, Fernandes e Guerra (2013), devido ao Nióbio ter alguns aspectos peculiares, às suas aplicações comerciais abrangem diversas áreas, como na obtenção de ligas de aço com alta resistência que são amplamente utilizadas na indústria automobilística, naval e construção civil. Umas das demandas que envolvem sua importância na tecnologia, é o uso para adquirir ligas supercondutoras, cerâmicas eletrônicas, lentes óticas e etc.

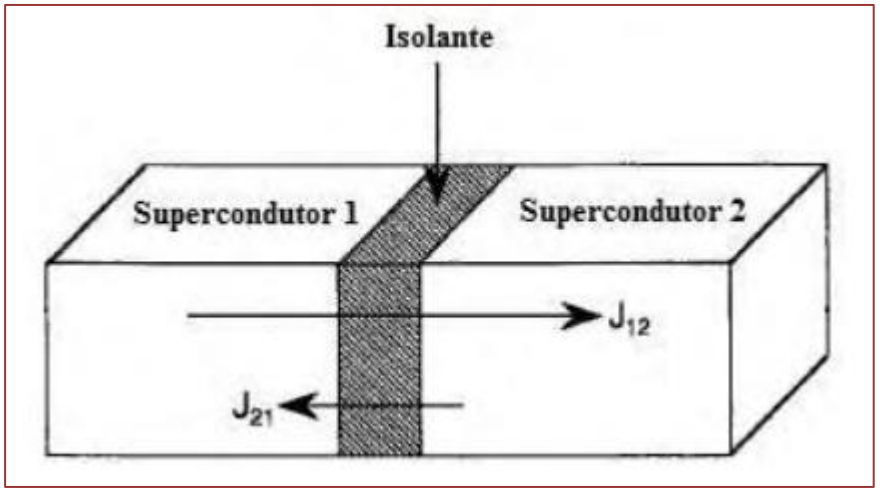
Para o Araujo-Moreira (2002), quando em estado de supercondução, a utilização do Nióbio para a construção de componentes eletrônicos impactaria da seguinte maneira:

construção de circuito que não tem perda de energia, resultando em uma maior eficiência; não dissipam calor, ou seja, um circuito eletrônico não irá superaquecer; alta capacidade de gerar campos magnéticos; chaves supercondutoras semelhantes a transistores (Junções de Josephson), que podem comutar cem vezes mais rápido.

### 2.7.1. JUNÇÕES DE JOSEPHSON

As Junções de Josephson são basicamente uma ligação entre três materiais, sendo eles supercondutor, isolante e supercondutor, como demonstrado na Figura 9 (Freitas et al., 2015).

**Figura 9:** Representação da junção de Josephson




Fonte: Poole et al., 2007.

Internamente nessas junções ocorre o Efeito Josephson, descrito como um efeito físico onde aparece uma corrente elétrica entre os supercondutores na ausência de uma diferença de potencial (Freitas et al., 2015).

Atualmente há diversas aplicações de Junções de Josephson em máquinas, como por exemplo: equipamentos que medem propriedades magnéticas dos materiais denominados de magnetômetros; equipamentos utilizados em estudos dos campos magnéticos do cérebro intitulados de magnetoencefalografia (Freitas, 2012).

## 2.8. SUPERCONDUTIVIDADE

Os materiais supercondutores é um assunto que interessa os cientistas desde o século XX. Esses materiais possuem a propriedade de ter uma resistência praticamente nula, facilitando a passagem de corrente elétrica (Branício, 2001).

Em 1911, o cientista Heike Kamerlingh-Onnes observou que com o mercúrio em uma temperatura muito baixa, era possível fazer a passagem de corrente elétrica sem quase nenhuma resistência. Esse evento foi denominado de supercondutividade, desde então, essa palavra é utilizada para representar materiais que possuem resistência muito

próxima de zero e outras propriedades. No prêmio Nobel em 1913, Onnes afirma que com a exposição a um campo magnético grande, faz com que o material perca o estado de supercondutor (Branício, 2001).

Após essa evidenciação, tornou-se muito frequente o interesse em encontrar materiais com essa particularidade. Algumas soluções que envolviam o Nióbio são: o Nióbio em 9.25 Kelvin (1929); a liga de Nióbio-Nitrogênio em 16 Kelvin (1941); a liga de Nióbio e Germânio em 23.2 Kelvin (1986) foi identificado como um supercondutor de alta temperatura (Branício, 2001).

Em 1957, a supercondutividade foi detalhada através da teoria BCS, elaborada por John Bardeen, Leon Cooper e John Schrie, e mostrou-se eficiente na representação da supercondutividade a baixas temperaturas em metais e ligas simples. No entanto, tratando-se da supercondutividade em temperaturas mais elevadas, ela é ineficaz (Branício, 2001).

A teoria BCS indica que dois elétrons viajando pela rede cristalina constituída de íons positivos deformam esta rede, que apresentará uma densidade de cargas positivas maior nas suas proximidades. Essa variação de densidade é instável e provoca um relaxamento na rede e a emissão de um fônon. Os elétrons "veem" uma rede distorcida e são atraídos para a região onde existe uma polarização de cargas positivas, esta atração poderá superar a repulsão coulombiana entre eles e há uma formação de um par de elétrons (pares de Cooper). Para se deter uma corrente formada por pares de Cooper, deve-se deter simultaneamente todos os pares de Cooper que se movimentam com uma dada velocidade. Se a energia térmica não for suficiente para destruir os pares, a corrente flui indefinidamente e o material apresenta resistividade nula (Instituto de Física da UFRGS *apud* Superconductors, 2016).

## 2.9. COMPUTADOR QUÂNTICO E COMPUTADOR CLÁSSICO

Atualmente, a quantidade de dados e a necessidade de um processamento mais rápido causado pelos avanços tecnológicos, impacta diretamente na área computacional. Desta forma, em decorrência dos estudos da teoria quântica, o computador quântico se tornou algo palpável e uma possível solução para essas questões (Crepaldi, Costa e Escobal, 2017).

Basicamente, o computador quântico baseia-se em fenômenos quânticos no processamento e armazenamento de dados, e o computador clássico aplica fenômenos físicos para realizar o mesmo processo (Crepaldi, Costa e Escobal, 2017). Um dos aspectos que difere o computador clássico do computador quântico, está diretamente relacionado aos registros de memória, onde o clássico pode admitir apenas um dos dois estados por vez e o quântico pode assumir os dois estados simultaneamente (Guerreiro, 2018).

Além disso, os computadores quânticos possuem um sistema de operação diferente dos clássicos. Ao invés de destruir a informação e produzir calor, ele realiza transformação quântica e reversível, desta forma, não gerando aquecimento. Com essas propriedades, presume-se que os computadores quânticos ultrapassem os atuais em relação a velocidade de processamento e na realização de tarefas (Guerreiro, 2018).

A partir de 2017 e 2018, grandes empresas como a IBM, Google e Microsoft divulgaram a construção de computadores quânticos com dezenas de *qubits* (Portugal e Marquezino, 2019).

## 2.10. UTILIZAÇÃO DO NIÓBIO PARA CONSTRUÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS EM UM COMPUTADOR QUÂNTICO

O Nióbio é um elemento químico aplicado na construção de componentes eletrônicos de um computador quântico atualmente, devido às suas propriedades. Um exemplo disso é o NbN (Nitreto de Nióbio) que possui algumas vantagens significativas, como a estabilidade química contra oxidação e alta qualidade cristalina (Kim et al., 2021).

Pesquisas relacionadas a materiais para capacitores ou ressonadores de microondas também apontam para compostos que utilizam Nióbio, como por exemplo o NbTiN (Nióbio Nitreto de Titânio). As Junções de Josephson de nitreto epitaxial consiste em três camadas, sendo elas NbN/AlN/NbN (Nitreto de Nióbio, Nitreto de Alumínio e Nitreto de Nióbio) são exemplares muito interessantes como um material alternativo para circuitos quânticos supercondutores (Kim et al., 2021).

Porém, ainda que o Nióbio disponha de propriedades e resultados consideráveis, são necessárias mais pesquisas relacionadas a sua utilização e materiais alternativos mais adequados para construção das Junções de Josephson (Kim et al., 2021).

## 3. METODOLOGIA

Para realização deste estudo, considerou-se correlacionar artigos que demonstram como o uso do Nióbio para construção de componentes eletrônicos pode revolucionar o processamento e eficiência de um computador quântico, se comparado aos processadores à base de Silício.

A revisão bibliográfica foi dividida em tópicos que são relevantes no entendimento do assunto, e consequentemente, para uma análise mais detalhada dos resultados.

Além disso, realizou-se pesquisas sobre o tema ”Semicondutores a base de Nióbio” para efeito comparativo e informativo referente a aplicação do Nióbio na computação quântica.

Atualmente, faltam estudos que demonstrem a realidade no processo produtivo de componentes eletrônicos utilizando Nióbio, além do entendimento mais aprofundado sobre a interpretação da supercondutividade em altas temperaturas.

Quando se fala de falta de um estudo que corrobora para o desenvolvimento de um novo tipo de tecnologia, reforça-se a importância da ciência e do método científico na sociedade (Vilelas, 2020).

Para compreensão da ciência, é importante entender onde a metodologia científica está situada. A palavra metodologia vem do Grego, sendo composta por “meta” que é traduzido como “para além de”, e "*hodos*" que significa “caminho”. Deste modo, metodologia consiste no caminho do pensamento e ação realizada para abordar a realidade. Quando se pensa em ciência e metodologia, são dois temas intrínsecos, pois, a metodologia científica é a ferramenta para que a ciência exista (Vilelas, 2020).

## 4. RESULTADOS

Atualmente os computadores quânticos ainda não são adequados para realizar a sua função sem falhas, um dos motivos disso seriam os materiais utilizados na construção das Junções de Josephson.

Após as pesquisas realizadas, é perceptível que um possível material para ajudar na redução de falhas é o Nióbio. Ele possui algumas características relevantes para a construção dos *hardwares* quando em estado de supercondução, reduzindo a perda de energia e não superaquecendo o circuito, além disso, ele pode ser usado na criação de chaves supercondutoras.

Algumas empresas estão se dedicando ao desenvolvimento dos computadores quânticos, como a IBM, Google e Microsoft. Por se tratar de estudos recentes, os relatos dos experimentos são de difícil acesso.

O artigo "*Enhanced coherence of all-nitride superconducting qubits epitaxially grown on silicon substrate*" publicado em 2021 demonstra testes experimentais que a utilização do Nitreto de Nióbio (NbN) na construção das Junções de Josephson apresenta vantagens no circuito de um computador quântico (Kim et al., 2021).

Ou seja, hoje há estudos que reforçam a eficiência superior do Nióbio como semicondutor e supercondutor, porém, não há um mapeamento objetivo do processo de fabricação de componentes eletrônicos à base de Nióbio, demonstrando que ainda é um nicho a ser estudado.

Ademais, é notável que o Nióbio pode ajudar na construção de *hardwares* para computadores quânticos, porém, necessita-se de mais pesquisas relacionadas à utilização do Nióbio e outros materiais para as Junções de Josephson, permitindo que o circuito eletrônico se torne adequado para o melhor funcionamento possível de um computador quântico (KIM et al., 2021).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se que a computação quântica é um setor em pleno desenvolvimento, pois, além de investimentos em tecnologia, a questão da qualificação da mão de obra deve ser considerada de forma mais ampla e estratégica para o país.

Diante da crescente demanda mundial por semicondutores, as empresas do setor vêm buscando tanto novas tecnologias, como também novos processos para atender suas necessidades produtivas e econômicas. Logo, estratégias devem ser definidas para processos de produção otimizados, além de investimentos públicos e privados, gerando assim, maior competitividade. As empresas nacionais podem aumentar sua competitividade ao adotar estratégias bem elaboradas para colaborar com o setor de P&D do governo e instituições que promovem o investimento, visando atender às demandas do ambiente macroeconômico. Isso é especialmente relevante no contexto da indústria de semicondutores, que está em constante crescimento e mostra uma tendência significativa em alinhar suas necessidades tecnológicas com a exploração de materiais alternativos, como o Nióbio.

Com a evolução da tecnologia, houve uma demanda crescente por computadores com processamento mais rápido. Portanto, estudos e experimentos sobre computadores quânticos se tornaram algo mais frequente.

Conforme o desenvolvimento e testes de *hardware*, detectou-se diversas inconsistências, demandando alteração da arquitetura dos circuitos e dos materiais utilizados como material primário para componentes eletrônicos. Dessa forma, notou-se crescimento nos estudos do Nióbio sendo aplicado como material base para componentes eletrônicos. Ressaltando que a utilização dele para fazer as Junções de Josephson tem trazido vantagens para o computador quântico. No entanto, esse é um tema com pouca informação, necessitando mais estudos.

## REFERÊNCIAS

[1] ARAÚJO-MOREIRA, F. M.; LANFREDI, A. J. C.; CARDOSO, C. A.; MALUF, W.; MOMBRÚ, A.; NAVAU, C. **O Fascinante Mundo dos Materiais Supercondutores**. Univerciência, Barreiras, p. 39-48, Dezembro 2002.

[2] BRANÍCIO, Paulo S. **Introdução à Supercondutividade, Suas Aplicações e a Mini-Revolução Provocada Pela Redescoberta do MGB2: Uma Abordagem Didática**. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 381-390, Dezembro 2001.

[3] BRUZIQUESI, Carlos G. O.; BALENA, Jose Gabriel; PEREIRA, Márcio César; SILVA, Adilson C.; OLIVEIRA, Luiz C. A. **Nióbio: Um Elemento Químico Estratégico para o Brasil**. Quim. Nova, São Paulo, v. 42, n. 10, p. 1184-1188, Novembro 2019. – SP

[4] CBMM - Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração **– Nióbio –** Disponível **em:** https://cbmm.com/pt/niobio#:~:text=Por%20ser%20capaz%20de%20transformar,marcapassos%2C%20sondas%20espaciais%2C%20foguetes%2C. Acesso em: 26 ago. 2023.

[5] CREPALDI, Caike; COSTA, Leonardo V.; ESCOBAL, Anderson A. **A História da Computação: Das Máquinas de Calcular aos Computadores Quânticos**. Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 1-10, Julho 2017.

[6] CRUZ, Eduardo Cesar Alves; JUNIOR, Salomão Choueri. **Eletrônica Aplicada**. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2009. E-book. ISBN 9788536505367. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536505367/. Acesso em: 20 set. 2022.

[7] FREITAS, Gustavo Quereza de. **Construção de uma junção Josephson em filmes finos supercondutores do sistema Bi1.8Pb0.4Sr2CaCu2Ox tratados termicamente em um forno microondas doméstico**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, p. 1-81, 2012. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/91977. Acesso em: 31 jul. 2023.

[8] FREITAS, Gustavo Quereza de; MORETO, Jéferson Aparecido; CENA, Cícero Rafael; CARVALHO, Claudio Luiz. **Construção de Junções Josephson do tipo ponte obtidas manualmente em uma pastilha de Bi1.6Pb0.4Sr2.0Ca2.0Cu3.0Ox**. Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, v. 1, n. 2, p. 14-21, Agosto 2015.

[9] GUERREIRO, Ariel. **Computadores Quânticos**. Revista de Ciência Elementar, Porto, v. 6, n. 3, p. 1-4, Setembro 2018.

[10] GUZZO, Pedro Luiz. **Quartzo**. Cap. 31, p. 681- 714 - Rochas & Minerais Industriais/Ed. Adão Benvindo da Luz e Fernando Antonio Freitas Lins. 2ª. ed. 990 p.: il. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

[11] Instituto de Física da UFRGS – **Teoria BCS.** *apud* Superconductor Terminology and the Naming Scheme. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20012/Carolina/bcs.html e Superconductor Terms Superconductors. Acessos em: 24 set. 2023.

[12] KIM, Sunmi; TERAI, Hirotaka; YAMASHITA, Taro; QIU, Wei; FUSE, Tomoko; YOSHIHARA, Fumiki; ASHHAB, Sahel; INOMATA, Kunihiro; SEMBA, Kouichi. **Enhanced Coherence of All-nitride Superconducting Qubits Epitaxially Grown on Silicon Substrate**. Communications Materials, v. 2, n. 1, p. 1-7, Setembro 2021.

[13] LIMA, José Maria Gonçalves de. **Relatório Técnico 20: Perfil da Mineração do Nióbio**. Ministério de Minas e Energia - MME., Brasília, p. 1-49. 2010.

[14] MALVINO, Albert P.; BATES, David J. **Eletrônica. v.1**. Porto Alegre: Grupo A, 2016. *E-book.* ISBN 9788580555776. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555776/. Acesso em: 20 set. 2022.

[15] PEIXOTO, Eduardo Motta Alves. **Silício**. Química Nova na Escola, São Paulo, n. 14, Novembro 2001.

[16] PIROPO, B. **Por dentro do processador.** TechTudo. Disponível em: https://www.techtudo.com.br/noticias/2012/11/por-dentro-do-processador.ghtml. Acesso em: 24 set. 2023.

[17] POOLE, Charles P.; FARACH, Horacio A.; CRESWICK, Richard J.; PROZOROV, Ruslan. **Superconductivity**. 2ª. ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 1-670. ISBN 9780080550480.

[18] PORTUGAL, Renato; MARQUEZINO, Franklin L. **Introdução à Programação de Computadores Quânticos**. Sociedade Brasileira de Computação, Belém, p. 1-51, Julho 2019.

[19] SCHLEIER, Rodolfo; GALITESI, Célia Regina Lulo; FERREIRA, Esmeralda Cristina Morau. **Silício e cálcio – Uma abordagem antroposófica**. Arte Médica Ampliada, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 102-113, 2014.

[20] SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica.** 1270 pg. 4 ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

[21] SIA - Semiconductor Industry Association. **2021 STATE of the U.S. Semiconductor Industry**. Washington, p. 1-27, set. 2021. Disponível em: https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/09/2021-SIA-State-of-the-Industry-Report.pdf. Acesso em: 19 nov. 2023.

[22] SIA - Semiconductor Industry Association. **2022 STATE of the U.S. Semiconductor Industry**. Washington, p. 1-32, nov. 2022. Disponível em: https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2022/11/SIA_State-of-Industry-Report_Nov-2022.pdf. Acesso em: 19 nov. 2023.

[23] SIA - Semiconductor Industry Association. **2023 STATE of the U.S. Semiconductor Industry**. Washington, p. 1-28, jul. 2023. Disponível em: https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2023/08/SIA_State-of-Industry-Report_2023_Final_080323.pdf. Acesso em: 19 nov. 2023.

[24] SILVA, Fabricio Ströher da; LENZ, Maikon Lucian; BEZERRA, Erick Costa; FREITAS, Pedro Henrique Chagas. **Eletrônica I**. Porto Alegre: Grupo A, 2018. *E-book.* ISBN 9788595026773. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595026773/. Acesso em: 20 set. 2022.

[25] SOUSA, Raquel Maria Ferreira de; FERNANDES, Lucianno Eduardo; GUERRA, Wendell. **Nióbio**. Química Nova na Escola, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 68-69, Fevereiro 2013.

[26] VASCONCELOS, Yuri; CHAVES, Léo Ramos. **O Polêmico Nióbio**. Revista Pesquisa Fapesp: Tecnologia Mineração, São Paulo, p. 64–69, Março 2019.

[27] VILELAS, José. **Investigação: O Processo de Construção do Conhecimento**. 3ª. ed. Lisboa: Edições Sílabo, 2020.

# Capítulo 2

## *Projeto de colunas de flotação: aplicação em processamento de minérios*

*Marco Aurélio Cremasco*
*Alessandra Suzin Bertan*

Resumo: No presente trabalho apresenta-se uma rotina de cálculo destinada ao projeto de colunas de flotação, baseado na obtenção de parâmetros construtivos, operacionais e fluidodinâmicos. Entende-se enquanto parâmetros construtivos: diâmetro e altura da coluna, altura das seções de coleta, de espuma e de resíduos. No caso de parâmetros operacionais, têm-se: velocidades superficiais da polpa e do gás na alimentação da coluna, da água de lavagem, bem como do tempo de residência da fase particulada. Em se tratando de parâmetros fluidodinâmicos, tem-se *holdup* do gás, diâmetro médio das bolhas, diferença de pressão na coluna devido ao contato entre as fases na região de coleta. A condição de projeto estabelecida é aquela em que a equação de projeto advenha da situação mais desfavorável de coleta. Assume-se, para tanto, que o tempo de permanência da fase líquida venha a ser igual ao tempo de residência da fase particulada, a alimentação da polpa ocorre na base da coluna, acarretando o contato em paralelo entre as fases. Para efeito de exemplificação, é fornecido projeto de colunas de flotação para a recuperação de apatita com capacidades de processamento de 100 litros/min e 200 litros/min e para diversas condições de dimensionamento.

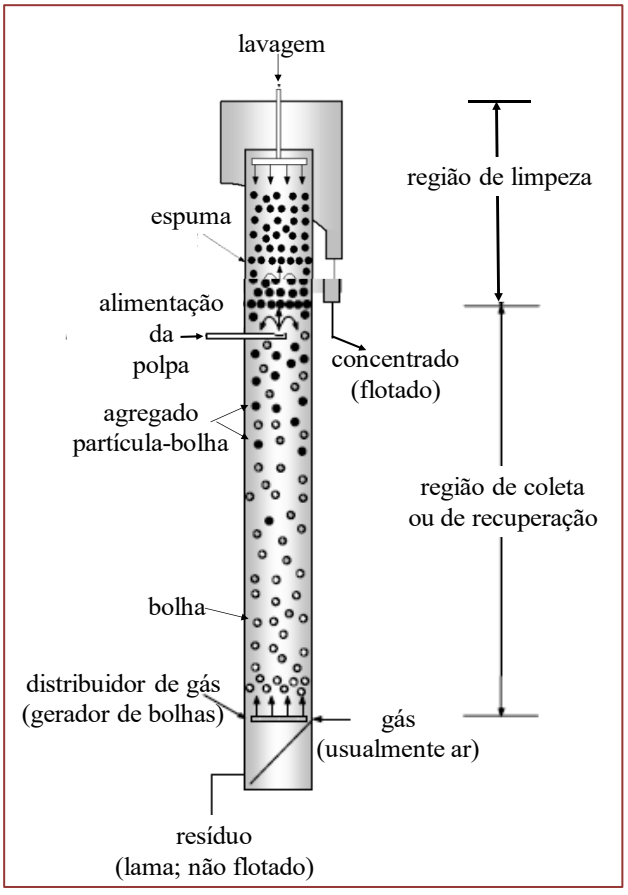
Palavras-chave: coluna de flotação, projeto, minério, apatita.

## 1. INTRODUÇÃO

Flotação refere-se à separação da fase particulada, em suspensão na fase líquida, por contato com uma fase gasosa, regida pela hidrofobicidade das partículas. Trata-se de sistema trifásico, em que as partículas aderem à fase gasosa, na forma de bolhas, ascendendo ao longo da altura do equipamento, até a sua superfície, acumulando-se na forma de espuma para, dessa feita, serem separadas. As partículas hidrofóbicas coletadas constituem o concentrado ou flotado, sendo separadas das partículas hidrofílicas, que abandonam a coluna, usualmente, por sua base, constituindo o resíduo ou a fração não flotada da fase particulada. Existem várias técnicas/máquinas de flotação identificadas, em linhas gerais, à flotação por ar dissolvido (FAD), flotação por dispersão da fase gasosa (FDA), flotação eletrolítica entre outras técnicas. Dentro da classe dos FDAs, estão as colunas de flotação, vistas, também, como modificações das torres de borbulhamento [1].

Um dos desafios de engenharia em se tratando de colunas de flotação, Figura 1, é o seu dimensionamento, em termos de parâmetros construtivos; o estabelecimento de condições operacionais, feito vazões/velocidades das fases que alimentam a coluna e o tempo de permanência da fase particulada; de características fluidodinâmicas, qual o *holdup* do gás e a diferença de pressão, e o rendimento de coleta.

**Figura 1**. Esquema simplificado de um flotador (baseado em [2])



As colunas industriais de flotação apresentam, tipicamente, altura (H) de 13 m [3], variando entre 10 m e 15 m [2], e diâmetro (D) entre 0,3 m e 2,0 m, podendo ter a sua seção transversal circular ou quadrada [3]. A região na qual as partículas são coletadas, $H_c$, essencialmente em contracorrente, tem entre 9,0 e 11 m de altura [3]. A altura da camada de espuma, $H_{esp}$, varia entre 0,5 a 1,5 m [4], podendo representar em até 20 % da altura total. A alimentação da polpa, já condicionada, é feita a aproximadamente a 2/3 da altura da coluna a partir de sua base [3]. Para condições típicas de processos industriais recomenda-se a relação $H_c/D=10$ [2, 3]. As condições operacionais encontradas usualmente em tal coluna, segundo Dobby et. al [3], são: velocidade superficial da fase gasosa, $q_G$, entre 1,0 cm/s a 3,0 cm/s; velocidade de polpa, $q_0$, entre, 0,5 cm/s a 2,0 cm/s; diâmetro médio das bolhas, $d_B$, entre 0,5 mm a 2,0 mm, e *holdup* do gás, $\varepsilon_G$, entre 10% a 25 %. No beneficiamento de minérios, é necessário o emprego de água de lavagem, $q_w$, encontrada normalmente entre 0,05 e 0,3 cm/s [4]. Em se tratando do projeto de coluna, utiliza-se usualmente o método *drift flux* [3], oriundo da formulação para a velocidade relativa entre as fases. Esse método vem sendo empregado no dimensionamento de colunas de flotação para o beneficiamento de minérios [2], e se utiliza, em sua maioria do contato em contracorrente na coluna, com a alimentação da polpa a 2/3 da altura da coluna a partir de sua base, assim como se emprega ou modelo de dispersão axial ou o modelo *plug-flow* para a descrição da recuperação do minério na região de coleta. Todavia, exceto a relação $H_c/D=10$, não se encontram difundidas as demais relações geométricas para viabilizar o dimensionamento.

Isto posto, objetiva-se no presente artigo apresentar uma rotina de cálculo para o projeto de colunas de flotação, baseado na obtenção de parâmetros construtivos, operacionais e fluidodinâmicos. A condição de projeto estabelecida é aquela em que equação de projeto advenha da situação mais desfavorável de coleta. Assume-se, para tanto, que o tempo de permanência da fase líquida é igual ao tempo de residência da fase particulada, a alimentação da polpa se dá na base da coluna, acarretando o contato em paralelo entre as fases, e a recuperação na região de coleta é descrita pelo modelo de mistura parcial.

## 2. PROJETO DE COLUNAS DE FLOTAÇÃO

De pronto, o projeto da coluna passa por seu dimensionamento. A primeira informação para tanto é o estabelecimento da relação $H_c/D = 10$ [3]. É necessário o conhecimento de outras grandezas construtivas. De posse do trabalho de Aquino [4] e das informações apresentadas no parágrafo anterior, é possível verificar que os parâmetros geométricos da coluna de flotação, incluindo a altura de resíduos, $H_{res}$, são: $H_c/D = 10$; $0,70 < H_c/H < 0,85$; $0,05 < H_{esp}/H < 0,20$; $0,05 < H_{res}/H < 0,10$. Além disso, a coluna de flotação guarda semelhança fluidodinâmica e características construtivas análogas à das colunas de borbulhamento. Evidencia-se tal analogia na diferença de pressão hidrostática, -ΔP [2,3],

$$-\Delta P = (1-\varepsilon_G)\rho_{sus} g \Delta h \qquad (1)$$

com $\varepsilon_G$ o *holdup* da fase gasosa; $\rho_{susp}$, massa específica da fração não flotada da polpa; g, constante gravitacional; Δh, cota das tomadas de pressão. A coluna de flotação ao envolver borbulhamento, é regida por sua capacidade de mistura. Os equipamentos de mistura completa são os que proporcionam a homogeneidade da concentração do soluto em todos os pontos no volume do equipamento, resultando na recuperação na região de coleta segundo [2,5]

$$R = \frac{k\tau_p}{1 + k\tau_p} \qquad (2)$$

sendo $\tau_p$ o tempo de permanência da fase particulada na região de coleta; k, constante cinética de primeira ordem da flotação. Nos contactores de fluxo em pistão (*plug-flow)* a remoção considerada ocorre em seções diferenciais ao longo da altura da região de coleta, ocasionando na recuperação como [2,5]

$$R = 1 - e^{-k\tau_p} \qquad (3)$$

Tanto o modelo de mistura completa quanto o de pistão são idealizados. O que se percebe é a situação intermediária, de mistura parcial, reconhecida como modelo de dispersão axial, cuja recuperação na região de coleta é [2, 5, 6]

$$R = 1 - \frac{4a\exp\left(\frac{1}{2}Pe\right)}{(1+a)^2\exp\left(\frac{a}{2}Pe\right) - (1-a)^2\exp\left(-\frac{a}{2}Pe\right)} \qquad (4)$$

com

$$a = \left(1 + 4\frac{k\tau_p}{Pe}\right)^{1/2} \quad e \quad Pe = \frac{U_R H_c}{E_L} \qquad (5)$$

em que Pe é o número de Peclet; $U_R$, velocidade relativa entre as fases no interior da coluna; $E_L$, o coeficiente de dispersão axial; $H_c$, altura da seção de coleta. Existem várias correlações para a predição do número de Peclet, como a de Mankosa *et al*. [7], válida para D < 1,0 m,

$$Pe = 0{,}70\left(\frac{H_c}{D}\right)^{0{,}63}\left[\frac{q_0}{q_G(1-\varepsilon_G)}\right]^{1/2} \qquad (6)$$

A região de limpeza afeta a recuperação total desejada, $R_T$, que é influenciada pelas duas regiões, limpeza ($R_f$) e coleta (R), do modo que segue [6]

$$R_T = \frac{RR_f}{RR_f + (1-R)} \qquad (7)$$

Yianatos *et al*. [8] propuseram uma correlação para a estimativa para a recuperação na região de limpeza, segundo

$$R_f = 0{,}95\exp\left\{-0{,}0144\left[\frac{H_{esp}(1+3q_w)}{q_G^3}\right]\right\} \qquad (8)$$

utilizando cm para a altura da região de espuma, $H_{esp}$, e cm/s para as velocidades superficiais da fase gasosa, $q_G$, e da água de lavagem, $q_w$. A água de lavagem provoca fluxo descendente de água na zona de coleta (bias), que tem a função de minimizar os efeitos do arraste hidráulico [2], sendo obtida de [4].

$$q_w = q_G\left(\frac{\varepsilon_{sf}}{1-\varepsilon_{sf}}\right) + q_b \qquad (9)$$

em que $\varepsilon_{sf}$ é o *holdup* da fase particulada na região de espuma (ou de limpeza), cujo valor situa-se ente 0,1 e 0,2 [4]. A velocidade $q_b$ é a velocidade superficial de bias, que se refere à fração residual de água de lavagem, 1,05 < B < 1,4 [4], que escoa através da coluna, cuja vazão volumétrica em relação à de alimentação da polpa é

$$Q_B = (B-1)Q \qquad (10)$$

A separação das fases fluidas e particulada na flotação guarda analogia com a separação gravitacional, em que se estabelece que a equação de projeto surja da situação mais desfavorável de coleta, na qual o tempo de permanência da fase fluida é igual ao tempo de queda da fase particulada [9,10]. No caso da flotação,

$$\tau_L = \tau_p \qquad (11)$$

sendo $\tau_L$ e $\tau_p$, os tempos de residência das fases líquida e particulada, respectivamente. Tem-se para o tempo de residência da polpa na coluna de flotação

$$\tau_p = \tau_L = \frac{H_c}{Bq_0}(1-\varepsilon_G) \qquad (12)$$

$q_0$, velocidade superficial de alimentação da polpa. Observe que $Bq_0$ é a velocidade superficial da fração não flotada. A Equação 12 pode ser retomada como

$$q_0 = (1-\varepsilon_G)\frac{H_c}{\tau_p B} \qquad (13)$$

Assim como outros equipamentos destinados à separação mecânica, a flotação passa, necessariamente, pela característica físico-química da polpa, da natureza da adesão partículas-bolhas, bem como da capacidade de operação, Q, que se relaciona com a sua velocidade superficial, $q_0$, segundo

$$q_0 = \frac{Q}{\text{Área}} \qquad (14)$$

em que Área se refere à área da seção transversal do flotador de acordo com

$$\text{Área} = \frac{\pi D^2}{4} \qquad (15)$$

Para estabelecer a equação de projeto, visando obter o valor do diâmetro do flotador, substitui-se a Equação 15 na Equação 14,

$$D = \left( \frac{4Q}{\pi q_0} \right)^{1/2} \qquad (16)$$

Fornecida a capacidade do flotador, Q, a variável a ser obtida é, à primeira vista, a velocidade superficial da polpa, $q_0$. Para obtê-la, utiliza-se a formulação para a velocidade relativa, $U_R$, considerando-se a contribuição do bias segundo

$$U_R = \frac{q_G}{\varepsilon_G} \pm \frac{q_0 + q_b}{(1-\varepsilon_G)} \qquad (17)$$

Admitindo que $q_b$ advenha das Equações 10 e 15, tem-se na Equação 17

$$U_R = \frac{q_G}{\varepsilon_G} \pm \frac{Bq_0}{(1-\varepsilon_G)} \qquad (18)$$

O sinal (-) refere-se ao contato em paralelo entre as fases; (+) contato contracorrente. Visto a Equação 11 ser escrita para a situação mais desfavorável de coleta, condição proposta no presente trabalho para a flotação em colunas, estabelece-se que tanto a alimentação da polpa quanto da fase gasosa dá-se na base do flotador e, portanto, assume-se o contato em paralelo entre as fases na Equação 18, retomada como

$$U_R = \frac{q_G}{\varepsilon_G} - \frac{Bq_0}{(1-\varepsilon_G)} \qquad (19)$$

Percebe-se, na Equação 19, a relação entre a velocidade relativa e a terminal de uma partícula (bolha) isolada, $v_{T\infty}$, à semelhança do tratamento clássico de Sistemas Particulados [9,10]. Tal relação, para a presente situação, é [3]

$$\frac{U_R}{v_{T\infty}} = (1-\varepsilon_G)^n \qquad (20)$$

Substituindo a Equação 20 na Equação 19, tem-se

$$v_{T\infty} = \frac{1}{(1-\varepsilon_G)^n} \left[ \frac{q_G}{\varepsilon_G} - \frac{Bq_0}{(1-\varepsilon_G)} \right] \qquad (21)$$

com o valor de n oriundo do modelo de Richardson e Zaki [10].

$$n = 4{,}45 Re_b^{-0,1} - 1, \text{ para } 1 < Re_b < 500 \qquad (22)$$

em que o número de Reynolds de uma bolha isolada é

$$Re_b = \frac{\rho_{susp} d_b v_{T_\infty}}{\mu_{susp}} \qquad (23)$$

que é obtido, considerando-se bolha esférica, segundo [11]

$$Re_b = \left[ \left( \frac{C_D Re_b^2}{24} \right)^{-0,95} + \left( \frac{C_D Re_b^2}{0,43} \right)^{-0,95/2} \right]^{-1/0,95} \qquad (24)$$

em que o número de Arquimedes modificado advém de

$$C_D Re_b^2 = \frac{4}{3} \frac{\rho_{susp} (\rho_{susp} - \rho_G) d_b^3 g}{\mu_{susp}^2} \qquad (25)$$

sendo $\rho_{susp}$ e $\mu_{susp}$ a massa específica e a viscosidade dinâmica do líquido não flotado; $\rho_G$ a massa específica do gás empregado na flotação e g, a constante gravitacional. Nas Equações 23 e 25 vê-se o diâmetro médio das bolhas, $d_b$, que é influenciado pela vazão do gás bem como do tipo distribuidor de gás como [12]

$$d_b = 1{,}56 Re_o^{0,058} \left[ \frac{d_o^2 \sigma_{susp}}{(\rho_{susp} - \rho_G) g} \right]^{1/4} \qquad (26)$$

desenvolvida para distribuidor de um orifício ou de pratos perfurados, válida para $1<Re_o<10$; com $Re_o=d_o q_G/\nu_G$, sendo $d_o$ o diâmetro do orifício; $\nu_G$, viscosidade cinemática da fase gasosa.

Nota-se, na Equação 21, outra incógnita: o *holdup* da fase gasosa, $\varepsilon_G$; contudo possível de ser estimada, por exemplo, pela correlação de Schumpe e Deckwer [13]

$$\varepsilon_G = 0{,}2 Bo^{-0,13} Ga^{0,11} Fr^{0,54} \qquad (27)$$

com $Bo=(gD^2\rho_{susp}/\sigma_{susp})$, $Ga=(gD^3/\nu^2_{susp})$, $Fr=q_G/(gD)^{1/2}$; válida para $1{,}4x10^3<Bo<1{,}4x10^5$, $1{,}2x10^7<Ga<6{,}5x10^{10}$, $3{,}0x10^{-3}<Fr<2{,}3x10^{-1}$, em que $\sigma_{susp}$ é a tensão superficial e $\nu_{susp}$, viscosidade cinemática da fração não flotada da polpa.

Verifica-se que, para a determinação de $q_0$ e de $q_G$, ainda se necessita de outra equação constitutiva. Retoma-se, para tanto, a abordagem da coluna de flotação enquanto reator

de mistura, na qual se encontram informações sobre o tempo de permanência da fase particulada, $\tau_p$, associado tanto ao modelo de descrição de mistura quanto ao grau de recuperação. Neste trabalho, é assumido que tal modelo é regido pela dispersão axial, Equação 4, empregada para a obtenção do tempo de permanência da fase particulada, desde que conhecida a recuperação pretendida na região de recuperação, R. Conhecido, portanto, o valor de $\tau_p$ obtém-se o valor de $q_0$. por meio da Equação 13.Isto posto, pode-se considerar o seguinte estudo de caso:

Dentre os minérios fosfáticos, importantes na indústria de fertilizantes, destaca-se a apatita, rica em $P_2O_5$, que pode ser recuperada via flotação. Para tanto, intenta-se projetar uma coluna destinada ao processamento de 100 litros/min de polpa condicionada de apatita, na intenção de se recuperar $P_2O_5$, empregando-se um flotador com distribuidor do tipo pratos perfurados de orifícios com 1,0 mm de diâmetro, tendo as seguintes proporções geométricas: $H_c$=10D; $H_c$=0,8H; $H_{esp}$=0,12H e $H_{res}$=0,08H. A fração volumétrica de sólidos na polpa é 30%, fornecendo viscosidade dinâmica 1,94 cP, massa específica de 1.150 kg/m$^3$, e tensão superficial igual a 60 mN/m$^2$ da polpa não flotada na coluna. O valor de bias (B) é 1,05 e a fração de sólidos na região de limpeza ($\varepsilon_{sf}$) igual 0,10. A massa específica e a viscosidade cinemática do gás são iguais, respectivamente, a 1,13 kg/m$^3$ e 0,166 cm$^2$/s. A constante cinética de primeira ordem da flotação é obtida, a partir de Aquino *et al.* [2], de

$$k = 0{,}10R_f^{-0{,}61} \text{ (k em min}^{-1}\text{)} \qquad (28)$$

Considera-se a recuperação na região de coleta, enquanto reator de mistura parcial, igual a 99,9%. Estime, também, o valor da recuperação total. O projeto da coluna de flotação segue o seguinte algoritmo:

1. O primeiro passo refere-se ao levantamento das informações conhecidas. No presente caso são fixadas as relações geométricas $H_c$=10D, $H_c$=0,80H, $H_{esp}$=0,12H e $H_{res}$=0,08H. São conhecidas as características da polpa, já condicionada em termos dos reagentes empregados na flotação, tais como a capacidade a ser processada, Q = 100 litros/min; as propriedades $\rho_{susp}$=1.150 kg/m$^3$, $\mu_{susp}$=1,94 cP, $\sigma_{susp}$=60 mN/m$^2$; $\rho_G$=1,13 kg/m$^3$; $\nu_G$ = 0,166 cm$^2$/s; constante da cinética de flotação, k, Equação 28; o valor de recuperação na região de coleta (R), assumindo mistura parcial, igual a 99,9%. Sabe-se que o distribuidor da fase gasosa que é do tipo prato perfurado, $d_0$ = 1,0 mm, bem são conhecidos o bias, B =1,05, e fração de particulados na região de limpeza, $\varepsilon_{sf}$=0,10.
2. Atribui-se valor para a velocidade superficial da polpa, $q_0$, entre 0,5 cm/s e 1,0 cm/s. Assume $q_0$ = 0,5 cm/s.
3. Conhecidos, Q, (passo 1) e $q_0$ (passo 2), obtém-se o diâmetro da coluna, Equação 16. Visto Q = 100 L/min e $q_0$ = 0,5 cm/s, tem-se D = 0,651 m.
4. Com $H_c$/D (passo 1) e D (passo 3) obtém-se $H_c$. Como $H_c$ = 10D; $H_c$ = 6,51 m.

   Obs. Cálculo do novo valor de $q_0$, utilizando-se a Equação 13. Os valores de recuperação, R, da constante cinética, k; da fração de bias, B, foram fornecidos no passo 1; todavia se desconhece $\varepsilon_G$. Essa grandeza depende de $q_G$; tal dependência é estendida à velocidade terminal, $v_{T\infty}$, que, por sua vez, depende de $Re_b$ (Equação 23), o qual é função do valor do número de Arquimedes modificado (Equação 24), que depende das propriedades das fases envolvidas (passo 1), bem como do $d_b$.

5. Calcula-se o diâmetro médio das bolhas (Equação 26). Antes, porém, será necessária uma primeira estimativa para esta grandeza, uma vez que depende de $q_G$. Assume-se, para a primeira estimativa, $d_b$ = 2,0 mm.
6. Com o valor do diâmetro da bolha, $d_b$, obtém-se o valor do número de Arquimedes modificado (Equação 25), $C_D\,Re_b^2 = 36.736{,}76$.
7. Utiliza-se a Equação 24 para a obtenção do número de Reynolds, $Re_b$=239,69 e n=1,572 (Equação 22).
8. Com o valor do número de Reynolds obtém-se $v_{T\infty}$ = 0,202 m/s (Equação 23).
9. Obtém-se uma expressão que estabelece a dependência de $q_G$ com $\varepsilon_G$, por meio, por exemplo, da Equação 27; ou seja, $q_G = q_G(\varepsilon_G)$,

$$q_G(\varepsilon_G) = q_G = 0{,}581\varepsilon_G^{1{,}852} \qquad (29)$$

10. Substitui-se B (passo 1), $q_0$ (passo 2), n (passo 7), $v_{T\infty}$ (passo 8) e $q_G=q_G(\varepsilon_G)$ (passo 9) na Equação 21 para obter o valor do *holdup* da fase gasosa, $\varepsilon_G$. Tem-se, para a primeira iteração (iniciando-a com $\varepsilon_G$ = 0,1) $\varepsilon_G$ = 0,0402.
11. Com o valor de $\varepsilon_G$ (passo 10), obtém-se a velocidade da fase gasosa por $q_G = q_G(\varepsilon_G)$ (passo 9), ou $q_G$ = 0,713 cm/s. Existe o processo iterativo para a obtenção de $\varepsilon_G$ a iniciar no passo 5. A partir da segunda iteração, emprega-se a Equação 26 para o cálculo do $d_b$, obtendo-se, após a convergência para $q_0$ = 0,5 cm/s: $d_b$ = 2,302 mm; $\varepsilon_G$ = 0,0486; $q_G$ = 1,011 cm/s.
12. Conhecidos os valores de B (passo 1), D (passo 3), obtém-se $q_b$ = 0,025 cm/s a partir das Equações 10 e 15. Com este valor em conjunto com $\varepsilon_{sf}$ (passo 1) e $q_G$ (passo 11), obtém-se de $q_w$ = 0,137 cm/s (Equação 9). Sabendo que $H_c$=6,51 m (passo 4), tem-se do passo 1: $H_c$=0,8H e $H_{esp}$=0,12H, resultando $H_{esp}$ =0,977 m. Substituindo $q_G$, $q_w$ e $H_{esp}$ na Equação 8, obtém-se $R_f$ =0,247. Levando este valor na Equação 28, obtém-se k=0,006 $s^{-1}$. Conhecendo-se este valor em conjunto com $H_c$/D (passo 1); $q_0$ ,$\varepsilon_G$ e $q_G$ (passo 11) obtém-se Pe = 2,153 (Equação 6) e $\tau_p$ = 65,1 min (Equação 4). Com tais valores chega-se à $q_0$ = 0,15 cm/s (Equação 13).
13. Compara-se os valores de $q_0$ advindos dos passos 2 e 12. Caso diferentes, dentro de um desvio estabelecido, toma-se novo valor para $q_0$ e retorna-se ao passo 3 até a convergência. Ao convergir o método, automaticamente tem-se os valores de $q_0$, $d_b$, $\varepsilon_G$ e $q_G$. Assim, da primeira interação, $q_0$ = 0,5 cm/s (passo 2) e ($q_0$ = 0,15 cm/s (passo 12). Retorna-se ao passo 3 até a convergência. O método converge para $q_0$ = 0,335 cm/s, resultando D = 0,796 m. Para efeitos construtivos, aproxima-se para D = 0,80 m, resultando $q_0$ = 0,33 cm/s. Retorna-se ao passo 4 e recalculam-se as demais variáveis: $d_b$=2,29 mm; $\varepsilon_G$=0,0446; $q_G$ = 0,93 cm/s.
14. Visto B = 1,05, D = 0,80 m, tem-se $q_b$ = 0,0165 cm/s (Equações 10 e 15).
15. Conhecido o valor da fração de particulados na região de limpeza, $\varepsilon_{sf}$ (passo 1), do valor convergido para a velocidade superficial da fase gasosa, $q_G$, (passo 11) e do valor da velocidade superficial do bias, $q_b$ (passo 14) obtém-se o valor da velocidade superficial da água de lavagem, $q_w$ = 0,12 cm/s) (Equação 9).

Obs. De posse da relação $H_c$ = 10D e D = 0,8 m, chega-se a $H_c$ = 8,0 m; do qual se obtém: H = $H_c$/0,8 = 10 m; $H_{res}$ = 0,08H = 0,8 m e $H_{esp}$= 0,12H =1,2 m. Com este valor estima-se aquele

da recuperação da região de espuma (Equação 8), $R_f$ =0,0512 para obter, utilizando-se a Equação 28, k=0,0115 $s^{-1}$.

16. Após a convergência para $q_0$, obtém-se o valor do tempo de permanência da fase particulada na coluna de flotação, conforme descrito no passo 12, ou seja $\tau_p$=37,6 min.

17. Para calcular a máxima diferença de pressão encontrada no flotador, referente apenas ao contato entre as fases envolvidas na região de coleta, $H_c$, retoma-se a Equação 1 como

$$-\Delta P = (1-\varepsilon_G)\rho_{sus} g H_c \qquad (30)$$

A diferença de pressão encontrada na região de coleta, $H_c$ = 8,0 m, referente apenas ao contato entre as fases envolvidas, é igual a $-\Delta P$ = 86,23 kPa.

18. Solicitou-se o valor da recuperação total, oriundo Equação 7. Como R = 0,999 (passo 1) e $R_f$ = 0,0512 (passo 15), tem-se $R_T$ =0,981.

A primeira coluna de resultados da Tabela 1 apresenta o resumo do projeto para o presente caso (caso A). As colunas restantes dessa tabela referem-se à capacidade de 200 litros/dia e $d_o$=1,0 mm (casos B a E). Nos casos B, C e D são mantidos: $H_c$=0,8H, $H_{esp}$=0,12H, $H_{res}$=0,08H e $d_o$=1,0 mm; sendo no caso B, $H_c$=10D; no caso C, $H_c$= 8D e no caso D, $H_c$=12D. No caso E, tem-se a relação $H_c$= 10D; todavia com as relações geométricas $H_c$=0,75H, $H_{esp}$=0,15H e $H_{res}$=0,1H. No caso F, mantém-se as mesmas relações do caso, E modificando-se, entretanto, $d_o$=1,3 mm. Em todas as situações é mantida a recuperação na região de coleta em 99,9%.

**Tabela 1.** Projeto de colunas de flotação

| Variáveis de projeto | Estudo de casos | A | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Parâmetros construtivos | D (m) | 0,8 | 0,86 | 0,96 | 0,78 | 0,78 | 0,97 |
| | H (m) | 10 | 10,8 | 9,6 | 11,7 | 10,4 | 12,9 |
| | $H_c$ (m) | 8 | 8,6 | 7,7 | 9,4 | 7,8 | 9,7 |
| | $H_{esp}$ (m) | 1,2 | 1,3 | 1,15 | 1,4 | 1,6 | 1,9 |
| | $H_{res}$ (m) | 0,8 | 0,86 | 0,77 | 0,94 | 1,04 | 1,29 |
| Parâmetros operacionais | $q_0$ (cm/s) | 0,33 | 0,57 | 0,46 | 0,70 | 0,70 | 0,45 |
| | $q_G$ (cm/s) | 0,93 | 0,90 | 0,86 | 0,94 | 0,94 | 1,08 |
| | $q_w$ (cm/s) | 0,12 | 0,13 | 0,12 | 0,14 | 0,14 | 0,143 |
| | $\tau_p$ ($min^{-1}$) | 37,6 | 21,8 | 24,8 | 20,1 | 16,9 | 31,0 |
| Parâmetros fluidodinâmicos | $\varepsilon_G$ | 0,0446 | 0,0432 | 0,0412 | 0,045 | 0,045 | 0,0465 |
| | $d_b$ (mm) | 2,29 | 2,287 | 2,281 | 2,292 | 2,292 | 2,91 |
| | -ΔP (kPa) | 86,23 | 92,83 | 83,07 | 100,84 | 84,03 | 104,34 |
| Recuperação total | $R_T$ (%) | 98,1 | 96,6 | 96,6 | 96,8 | 95,4 | 97,6 |

Da análise da Tabela 1, observa-se que a duplicação da carga processada (casos A e B) pouco impacta no dimensionamento da coluna para o beneficiamento estudado. O efeito da relação $H_c$/D (casos B a D) acarreta no aumento da perda de carga ao se aumentar tal relação. Neste caso, a eleição da melhor configuração recai muito mais na viabilidade de construção da coluna. Por outro lado, a redução no valor da queda de pressão pode ser conseguida ao se alterar as relações geométricas (caso E comparado ao caso D), mantendo-se os mesmos parâmetros operacionais, sem a diminuição significativa da recuperação total. Nota-se, também, que um leve no incremento no diâmetro dos orifícios

do distribuidor de gás, caso F comparado ao caso E, ocasiona substancial aumento tanto nas dimensões da coluna quanto na diferença de pressão. Há de se notar que a eleição da melhor configuração passa por estudo de custo/benefício envolvendo recuperação total e perda de carga, além da viabilidade construtiva do equipamento.

## 3. CONCLUSÃO

O projeto de colunas de flotação não é trivial, pois depende fortemente da polpa, incluindo o seu condicionamento, bem como da capacidade máxima a ser tratada. Além disso é essencial a eleição do tipo de distribuidor de gás, uma vez que este influencia, por exemplo, na estimativa do diâmetro médio das bolhas, incluindo o seu formato (esfericidade). Essas informações são fundamentais para a definição de equações constitutivas (correlações) para a predição de parâmetros operacionais, feito a velocidade superficial da fase gasosa podendo, inclusive, considerar a esfericidade das bolhas [11] e o *holdup* do gás que não, necessariamente, são aquelas apontadas neste artigo. Todavia, o presente trabalho oferece um procedimento de cálculo factível, permitindo diversas estratégias para o projeto de uma coluna de flotação, notadamente aqueles relacionados aos parâmetros construtivos, operacionais e fluidodinâmicos.

## REFERÊNCIAS

[1] Sarhan AR, Naser J, Broojs, G. CFD Modeling of three-phase flotation column incorporating a population balance model. Procedia Engineering.2017;184;313–317.

[2] Aquino JA, Oliveira MLM, Fernandes MD. Flotação em coluna. In Luz AB, Sampaio JA, Almeida SLM. Tratamento de Minérios. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT; 2004. p. 458-495.

[3] Dobby GS, Yianatos JB, Finch JA. Estimation of bubble diameter in flotation columns from drift flux analysis. Canadian Metallurgical Quarterly. 1998;27;2;85-90.

[4] Aquino JA. Estudo da flotação em coluna convencional, agitada e de recheio [tese de doutorado]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 1998.

[5] Tuteja RK, Spottiswood DJ, Misras, VN. Mathematical models of the column flotation process: A review. Minerals Engineering; 1994;7;12;1459-1472.

[6] Finch JA, Dobby GS. Column flotation. Oxford: Pergamon Press; 1990.

[7] Mankosa MJ, Luttrel GH, Adel GJ. A study of axial mixing in column flotation. International Journal of Mineral Processing. 1992;35;1–2;51-64.

[8] Yianatos JB, Bergh LG, Cortés GA. Froth zone modelling of an industrial flotation column. Minernls Engineering. 1998;11;5;423-435.

[9] Massarani G. Fluidodinâmica em sistemas particulados. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ; 1997.

[10] Cremasco MA. Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. 3. ed. São Paulo: Blucher; 2018.

[11] Coelho RML, Massarani G. Fluidodinâmica da partícula Isolada. Uberlândia: Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. 1996;1;19-23.

[12] Kumar A, Delgaleesan TE, Laddha GS, Hoelscher HE. Bubble swarm characteristics in bubble columns. Canadian Journal of Chemical Engineering.1978;54;6;503-508.

[13] Shumpe A, Deckwer WD. Viscous media in tower bioreactors: hydrodynamic characteristics and mass transfer properties. Bioprocess Engineering. 1986;2;79–94.

# Capítulo 3

## *Estudo da influência de adição de cobre e temperatura de sinterização em aço inoxidável ferrítico 430L obtido via metalurgia do pó convencional*

*Cesar Henrique Rocha Silveira*
*Rafael Menezes Nunes*

Resumo: Neste trabalho foi investigado as influências de temperatura, tempo e adição de pó de cobre nas propriedades mecânicas, microestruturais e na densificação de amostras fabricadas utilizando pó ligado de aço inoxidável ferrítico 430L via metalurgia do pó convencional. Foram fabricadas 6 amostras para cada uma das condições, nas dimensões de 13 mm de diâmetro e 11 mm de altura, preparadas a partir de pó de aço inoxidável ligado ferrítico 430L com variação na quantidade de adição de pó de Cobre na mistura. Foram investigadas 3 diferentes porcentagens de Cobre: 1%, 2%, 5% em massa através de condições distintas, junto a duas condições sem cobre, nas quais houve variação na temperatura, tempo e atmosfera de sinterização. As amostras sinterizadas foram compactadas a partir do processo de metalurgia do pó convencional utilizando-se uma matriz uniaxial com pressão de compactação de 800 MPa. Antes de iniciar os experimentos foi realizada uma curva de compactação com 10 amostras em diferentes pressões de compactação desde 100 MPa até 1000 MPa do aço inoxidável 430L sem adição de cobre, com objetivo de determinar as melhores condições de compactação. A sinterização foi realizada em um forno tubular com atmosfera controlada em temperaturas de 1250°C por 30 minutos e 1350°C por 60 minutos. Após a sinterização as amostras foram novamente avaliadas em relação às seguintes propriedades: densidade, microestrutura, e propriedades mecânicas. Os resultados mostram uma significativa influência da quantidade de Cobre, da temperatura e do tempo de sinterização nas propriedades finais obtidas nos experimentos.

Palavras-chave: metalurgia do pó, aço inoxidável ferrítico, adição de cobre.

## 1. INTRODUÇÃO

A fabricação de componentes industriais por meio da metalurgia do pó vem crescendo ao longo do tempo, os aços inoxidáveis estão ganhando cada vez mais espaço nesse mercado, principalmente no campo das ligas metálicas resistentes à corrosão. Esses materiais são amplamente utilizados em diversas aplicações industriais como: aeroespacial, automotiva, química, médica, produtos tecnológicos e recreativa. Compreender e aprimorar os fatores de processamento do aço inoxidável em Metalurgia do Pó (MP) são essenciais para maximizar suas propriedades e otimizar o uso eficiente de materiais, assim uma das formas de buscar uma melhoria das propriedades de resistência vem por meio de uma chamada sinterização ideal, definida como a qual por meio de um controle rigoroso dos parâmetros de sinterização seria possível eliminar quase todos os defeitos metalúrgicos, com exceção de alguns óxidos que tem origem principalmente no processo de fabricação dos pós. A sinterização em fase líquida pode ser uma forma de alcançar esses resultados, pois permite um aumento na densidade e uma diminuição na porosidade (ASM Handbook, 2007).

O objetivo desse trabalho é investigar os efeitos da adição de pó de cobre através da metalurgia do pó convencional para produção de amostras de material base de aço inoxidável 430, visando melhorias nas propriedades físicas, metalúrgicas e mecânicas. Avaliando a influência das proporções de pó de cobre na composição da mistura quanto a propriedades físicas e metalúrgicas, analisando ainda propriedades mecânicas como resistência à compressão das amostras produzidas com diferentes teores de pó de cobre e temperaturas.

## 2. METALURGIA DO PÓ APLICADA A AÇOS INOXIDÁVEIS

As três principais famílias assim denominadas dos aços inoxidáveis consideradas ideais para processamento por metalurgia do pó convencional são austeníticos, ferríticos e martensíticos, as principais características dessas três são que os austeníticos possuem boa resistência a corrosão, sendo basicamente uma liga de Fe-Cr-Ni e a sua denominação surgiu devido à microestrutura austenítica mesmo em temperatura ambiente. Os ferríticos são uma liga de Fe-Cr, onde o Cromo é o principal responsável pelas propriedades químicas e mecânicas, seu nome tem origem na sua microestrutura ferrítica e um de seus diferenciais está nas suas propriedades magnéticas. Já os Martensíticos são ligas a base de Fe-Cr com teor elevado de carbono, até 1,2%, que quando tratadas termicamente através de um resfriamento rápido, seguido de um revenimento, apresentam uma microestrutura martensítica de alta ductibilidade e tenacidade (ASM Handbook, 2007; Neves, 2015).

Os inoxidáveis ferríticos possuem como principal concorrente no campo de aplicações os austeníticos, que se diferenciam por suas elevadas resistências à corrosão e as altas temperaturas, esse último também possui maior capacidade de ganho de resistência mecânica por encruamento, melhor usinabilidade, porém os ferríticos se destacam por suas propriedades magnéticas, e ainda uma maior taxa de redução dimensional durante a sinterização. As classes ferríticas utilizadas para processamento por Metalurgia do Pó são somente aquelas consideradas de baixo e médio percentuais de cromo, 10% a 14% e 15% a 19%, de categoria grau baixo carbono que possuem um “L” na sua referência alfanumérica. Pequenas quantidades de nióbio são adicionadas como estabilizante contra sensibilização do Cromo, o qual se combina com o carbono evitando a formação de carbonetos, e ainda permitindo sua soldagem. Sua sinterização em atmosfera de

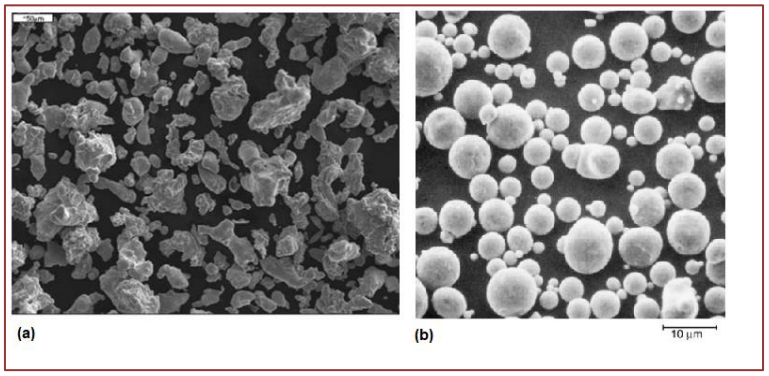
nitrogênio não é recomendada, porque favorece a formação de quantidades excessivas de nitretos de Cromo e Nióbio (ASM Handbook, 2007; Neves, 2015).

No processo de fabricação de pós de aços inoxidáveis é importante que haja um controle das propriedades fundamentais físicas e da composição química, ainda quanto a partícula temos tamanho, distribuição, escoamento e geometria. As principais técnicas utilizadas no controle do tamanho de partícula e distribuição das mesmas são o peneiramento, a dispersão de luz, a análise por microscopia óptica e a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Após a etapa de caracterização dos pós geralmente há necessidade de um processo de mistura da matéria-prima, seja com lubrificantes que reduzem o atrito entre matriz e partículas, melhoram a resistência a verde e podem agir ainda como desmoldantes, ou outros pós de diferentes composições, para que assim sejam alcançados os melhores parâmetros como: densidade aparente, taxa de escoamento, resistência a verde, compressibilidade entre outros (ASM Handbook, 2007; Neves, 2015).

## 3. COMPACTAÇÃO DE PÓS METÁLICOS

A compactação próxima etapa na rota de produção de componentes por metalurgia pó convencional, possui duas principais técnicas de compactação, as realizadas à quente, com aplicação de temperatura na matriz, ou à frio, considerada essa uma prensagem a temperatura ambiente. Assim o ganho principal nessa etapa é a diminuição dos poros através do preenchimento de vazios existentes, o que acaba também facilitando a densificação durante a sinterização. Nessa etapa de processamento a compactação a frio acaba sendo preferível quando da utilização de pós fabricados por meio de atomização em água, que geram partículas irregulares, figura 1a, o que acaba favorecendo o alcance de maiores densidades na prensagem nessas condições. Já nos pós utilizados na compactação a quente, existe um uso maior daqueles produzidos por atomização a gás, figura 1b, o que torna nesse caso o formato de partícula esférica, alcançando menores densidades de compactação e altas densidades dos sinterizados (ASM Handbook, 2007; Neves, 2015).

**Figura 1:** Exemplos de pós de aço inoxidável. (a) 409L atomizado em água e (b) 316L atomizado à gás



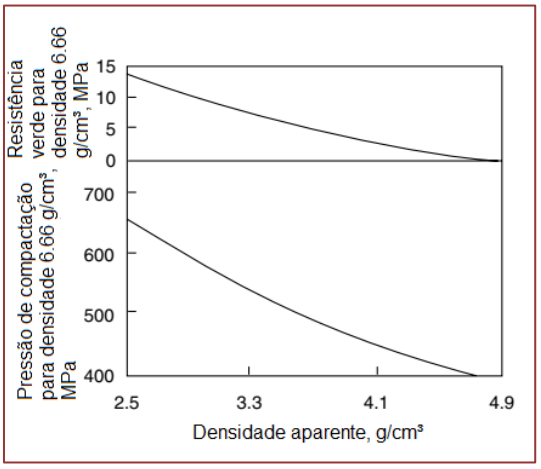

Fonte: (ASM Handbook, 2007).

A compressibilidade de uma mistura de pós elementares ou de um pó pré-ligado, assim como a força necessária para compactação são muito influenciadas por parâmetros como tamanho e a distribuição de partículas, sendo que o resultado desse processo todo acaba

sendo uma peça com maior ou menor porosidade e densidade. A densidade aparente é um parâmetro com o qual é possível realizar um comparativo entre pós de materiais diferentes e ainda pode-se relacioná-la com outras propriedades, pois apesar de haver métodos estatísticos com os quais é possível quantificar os formatos de partículas, ainda a densidade aparente desponta como a melhor forma de realizar uma classificação dos materiais (ASM Handbook, 2007; Neves, 2015).

Maiores densidades aparentes requerem menores pressões de compactação para uma mesma determinada densidade a verde, figura 2, melhorando assim a compactibilidade, porém ao mesmo tempo há uma diminuição na resistência da amostra verde. A obtenção de maiores densidades por meio do aumento da pressão de compactação gera um aumento no consumo de energia elevando o custo de produção.

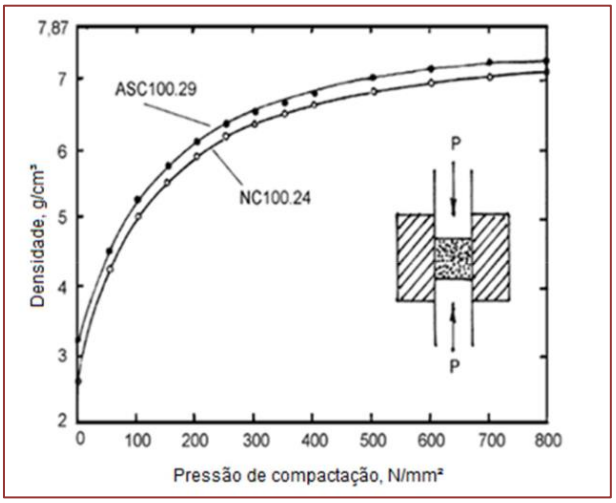
**Figura 2:** Efeito da densidade aparente na resistência verde e compressibilidade de pós de aço inoxidável 316L




Fonte: (ASM Handbook, 2007).

Assim é mais interessante que sejam alcançadas as maiores densidades de compactação com as menores pressões possíveis, ainda mesmo pós de ferro com identidades químicas semelhantes possuem curvas de compressibilidade diferentes, figura 3, isso ocorre por influência de uma diferença entre estruturas de partículas. A partir de 700 MPa o ganho de densidade não justifica o aumento de pressão, essas curvas possuem como principal finalidade a avaliação em ambiente laboratorial das melhores condições de compactação do material (ASM Handbook, 2007; Höganas, 2013).

**Figura 3:** Curvas de compressibilidade para dois pós de ferro comerciais prensados numa matriz bí-axial de carboneto, com diâmetro interno de 25 mm. Adições de lubrificante: 0,75% de Zn-estearato




Fonte: (Höganas, 2013).

Na prática a resistência verde ideal é aquela na qual é possível o manuseio seguro, sem que haja um prejuízo excessivo na compressibilidade necessária ao alcance das melhores condições de sinterização. Um formato de partícula de pó irregular produzido por atomização a água, proporciona maiores densidades aparentes e uma melhor compressibilidade, porém exige uma temperatura de sinterização bem maior, devido à concentração superficial de óxidos residuais. A densidade de compactação obtida com a utilização de misturas de pós é diretamente influenciadas por fatores como: peso específico, quantidade relativa de lubrificante e impurezas. A densidade teórica de uma mistura de pós considerando amostras não porosas de ferro, podem ser calculadas através da fórmula da equação (1) (ASM Handbook, 2007; Höganas, 2013).

$$D_m = \frac{100}{\left(\frac{W_{Fe}}{\rho_{Fe}} + \frac{W_1}{\rho_1} + \frac{W_2}{\rho_2} + \frac{W_3}{\rho_3} + \ldots \frac{W_n}{\rho_n}\right)} \qquad \text{Eq. 1}$$

Onde:

$D_m$: Densidade ponderada de misturas de pós

$W_{Fe}$: Porcentagem em peso de pó de ferro

$\rho_{Fe}$: Peso específico do pó de ferro (pó de base)

$W_1$, $W_2$, $W_3$, $W_n$: Porcentagem em peso de pó de impurezas ou aditivos

$\rho_1$, $\rho_2$, $\rho_3$, $\rho_n$: Peso específico do pó de impurezas ou aditivos

Uma possibilidade de melhora nas propriedades de uma misturas de pós é através de uma liga mecânica, os estudos de Ammar; Khalil; Sherif, (2015) demonstrou que a produção de ligas de alumínio usando essa técnica oferece benefícios significativos, incluindo o aumento da solubilidade de elementos como titânio e cobre na matriz de alumínio, a

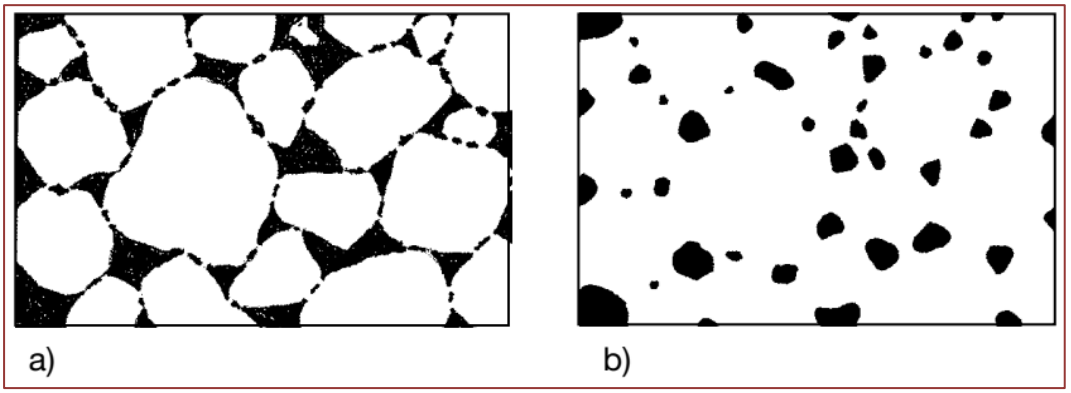
formação de soluções sólidas supersaturadas e a redução do tamanho dos cristais para a escala nanométrica. Com ajustes no tempo de moagem e na proporção de peso entre as bolas e o pó, esses efeitos se intensificam, aprimorando as propriedades estruturais das ligas. O processo de sinterização, essencial para consolidar amostras densas, promove a formação de fases duras, como $Al_2Cu$ e $Al_3Ti$, que melhoram a resistência e a dureza da liga, inclusive em temperaturas elevadas. Dentre as amostras testadas, a liga Al-10%Cu-5%Ti se destacou com a maior dureza, atribuída às fases contendo Ti, que mantêm sua integridade e resistência até 400°C, tornando essas ligas promissoras para aplicações que exigem estabilidade térmica e alta resistência (Ammar; Khalil; Sherif, 2015).

## 4. SINTERIZAÇÃO DE PÓS METÁLICOS

Os principais parâmetros que possuem influência durante o processo de sinterização de pós metálicos são: Temperatura, tempo, geometria e tamanho das partículas, composição da mistura, densidade das amostras verdes e atmosfera do forno de sinterização. Os primeiros fornos utilizados na sinterização de aços inoxidáveis foram os de esteira, em temperaturas máximas de aproximadamente 1150°C em atmosfera de Amônia Dissociada, com o tempo foi ocorrendo uma mudança gradual para atmosferas como de Hidrogênio, vácuo e uma mistura de gases 90% de Hidrogênio e 10% de Nitrogênio, junto a um aumento na temperatura de sinterização. De forma simples a sinterização pode ser resumida como um processo de ativação térmica no qual há uma transmissão de massa resultando numa diminuição da área de superfície livre, com um aumento da região de contato entre partículas de pó, processo no qual o resultado final é uma redução no volume e no formato dos poros (ASM Handbook, 2007; Höganas, 2013).

Os parâmetros mais apropriados para o processo de sinterização são primordiais para que sejam alcançados os melhores resultados, mas essa seleção não é uma tarefa simples, pois o tempo e a temperatura têm uma relação inversamente proporcional, uma vez que quanto maior a temperatura menor o tempo necessário para que haja uma maior ligação entre partículas.

**Figura 4:** Fases do processo de sinterização. (a) Diminuição da superfície livre entre partículas com a formação de pescoço e (b) fase final com contração e arredondamento dos poros




Fonte: (Höganas, 2013).

Porém os custos de implementação de fornos adequados com altas temperaturas inviabilizam muitas vezes essa aplicação, assim acabam sendo utilizados maiores tempos para que sejam alcançados os resultados esperados, mesmo que isso resulte num maior tempo de produção. Outro fator que acelera o mecanismo de sinterização é quando há algum aditivo na mistura de pós em fase líquida, quando utilizado o pó de ferro puro, os parâmetros de sinterização usuais são temperaturas de 1120ºC a 1150ºC e tempos de 15 a 60 minutos (Höganas, 2013).

É possível realizar o processo de sinterização em temperaturas relativamente mais baixas, Bhootpur; Brouwer; Tang, (2023) em sua pesquisa explora o uso do óxido de bismuto ($Bi_2O_3$) como aditivo na sinterização de dióxido de zircônio ($ZrO_2$), buscando unir os benefícios da sinterização em temperaturas menores com a conversão local de hidróxido de zircônio ($Zr(OH)_4$) em $ZrO_2$ e vapor d'água a 400°C. A técnica visa obter densidade elevada e uma sinterização eficaz em temperatura reduzida de 900°C num único passo. Tradicionalmente, a sinterização de $ZrO_2$ exige temperaturas acima de 1200°C, mas a adição de $Bi_2O_3$ permite a sinterização em fase líquida que facilita o transporte de massa, promovendo melhor densificação das partículas em temperaturas moderadas. A pesquisa utiliza diferentes pressões de compactação (50, 150 e 300 MPa) e proporções de $Bi_2O_3$ (5%, 10% e 15%) para avaliar os efeitos na densidade, dureza e composição de fase, a fim de desenvolver um método de sinterização com balanço econômico de energia e boas propriedades mecânicas em estabilidade de fase tetragonal da zircônia (Bhootpur; Brouwer; Tang, 2023).

Maria *et al.*, (2017) também discute o processo de sinterização em temperaturas mais baixas que os processos tradicionais, essa técnica consolida pós inorgânicos em temperaturas entre a ambiente e 300°C, usando uma prensa uniaxial num processo distinto sem o processo de ativação térmico de sinterização, não exigindo assim altas temperaturas, oferecendo uma abordagem inovadora para densificar materiais sem a necessidade de alta energia térmica. O processo de sinterização em temperaturas mais baixas pode ser dividido em duas etapas, na primeira, a densificação ocorre por força mecânica, semelhante à compactação convencional, mas com a ajuda de baixa energia térmica gerando uma fase líquida que facilita o rearranjo das partículas. A segunda etapa envolve o aumento de temperatura e pressão, o que promove a solubilidade das partículas e a formação de uma fase líquida supersaturada. Isso pode levar a diferentes mecanismos de precipitação, como a nucleação heterogênea ou homogênea, ou até a formação de uma fase intermediária que se converte no produto. Em alguns casos, como no NaCl, a sinterização pode ocorrer sem pressão externa, sendo movida apenas por forças capilares. O trabalho de Maria *et al.*, (2017) também explorou a escolha de solventes, temperatura e pressões e as suas influências na sinterização de materiais como ZnO e Li2MoO4, demonstrando o potencial do processo para uma variedade de materiais. Embora os mecanismos observados sejam consistentes com os dados disponíveis, mais experimentos são necessários para expandir e otimizar a técnica para outros elementos (Maria *et al.*, 2017).

Ao longo do tempo a metalurgia do pó foi se desenvolvendo de forma que fosse possível produzir componentes cada vez mais precisos e não simplesmente os mais densos, as técnicas de processamento foram sendo aprimoradas, buscando uma maior compactação da peça verde, com objetivo de alcançar os menores níveis de porosidade, o que resulta numa menor redução de volume durante a sinterização. Nesse caso a propriedade de compressibilidade do pó se torna ainda mais importante, pois um fator limitante será a capacidade das prensas utilizadas para tanto, assim por razões técnicas e econômicas as

densidades indicadas para essa finalidade são na faixa de 6,8 a 7,1 g/cm$^3$ e pressões de compactação de 600 a 800 MPa (Gierl-Mayer, 2020).

A sinterização em fase líquida (LPS) é um processo consolidado desde os anos 1930 e envolve a densificação de materiais cerâmicos e metálicos ao aquecer partículas mistas acima da temperatura do sólido. Com o desenvolvimento de simulações computacionais, tornou-se possível prever a microestrutura e a forma final dos componentes. Na LPS, o sólido dissolve-se no líquido, promovendo densificação, especialmente em sistemas com partículas pequenas e maior teor de líquido. A densificação ocorre por mecanismos como rearranjo das partículas, solução-reprecipitação e sinterização em fase sólida, enquanto o crescimento dos grãos segue um processo controlado por difusão e coalescência, afetado pela quantidade de líquido. German; Suri e Park, (2009) buscaram parâmetros para melhorar o controle dimensional reduzindo distorções e minimizando custos de pós-processamento, considerando fatores como granulometria, condições de mistura e compactação. Modelos de simulação recentes integram esses fatores e avançam para simulações precisas, visando otimização de densidade, microestrutura e propriedades finais dos materiais sinterizados (German; Suri; Park, 2009).

A sinterização por plasma de alta corrente (Spark Plasma Sintering - SPS), na qual os pós são prensados uniaxialmente num molde de grafite e uma corrente contínua pulsada é simultaneamente aplicada, sendo essa uma técnica inovadora usada para fabricar componentes de cobre ultrafino em grande escala. O processo de sinterização é dividido em quatro estágios, com base na evolução da microestrutura: ativação e refino do pó, formação e crescimento do pescoço de sinterização, densificação rápida e densificação por deformação plástica. Apenas quando esses estágios acontecem em sequência e são totalmente completados, é possível obter um compacto de alta qualidade. No caso do pó de Cobre fino, os parâmetros de sinterização utilizados foram: temperaturas de sinterização de 350 °C a 800°C, pressões de compactação de 1 MPa a 50 MPa, tensão de 5,5V e corrente de 3,1 KA, taxa de aquecimento de 80°C/min e tempo de patamar de 6 minutos. A otimização desses parâmetros melhora tanto a resistência à tração quanto o alongamento do cobre ultra fino, devido ao menor tamanho de partícula e consequentemente menor tamanho de grão. A evolução da microestrutura no processo de SPS para pós metálicos ultrafinos depende largamente dos parâmetros de sinterização, mas, independentemente das variações, sempre surgem quatro estágios característicos ao longo dos estágios do processo (Zhaohui *et al.*, 2008).

Wang *et al.*, (2021) apresenta uma abordagem inovadora para a produção de pós do polímero PEEK (quimicamente conhecido como polieteretercetona) e compósitos de nanotubos de carbono (CNT), formando a mistura PEEK/CNT, para uso na tecnologia de Sinterização Seletiva a Laser (SLS). A técnica empregada foi a separação de fases induzida termicamente (TIPS), que permitiu a produção de pós com formato quase esférico e uma distribuição de partículas ideal para a aplicação em SLS. Os pós resultantes mostraram boa fluidez e processabilidade, e a análise de microscopia eletrônica de varredura (SEM) confirmou a incorporação de CNTs no pó de PEEK. A adição de CNTs aumentou a cristalinidade do pó de PEEK em comparação com o PEEK puro. A taxa de sinterização dos pós foi investigada por microscopia em estágio de aquecimento, mostrando que o pó de PEEK/CNT teve um atraso de 6 segundos na coalescência em relação ao PEEK puro. As propriedades térmicas dos pós foram analisadas por calorimetria diferencial de varredura (DSC), revelando que a adição de 0,1% de CNT não afetou as temperaturas de fusão e recristalização do PEEK, mas aumentou a cristalinidade devido ao efeito de nucleação das CNTs. A processabilidade dos pós desenvolvidos foi validada pela

fabricação de filmes de camada única no sistema HT-SLS. Os filmes sinterizados apresentaram uma estrutura integrada e superfície relativamente lisa, indicando boa adesão entre as partículas do pó. As propriedades térmicas e mecânicas dos filmes sinterizados foram avaliadas por DSC e DMA, mostrando que o filme de PEEK/CNT teve maior módulo de armazenamento e módulo de perda devido à maior cristalinidade, embora o fator de amortecimento fosse semelhante ao do PEEK puro. O estudo mostrou que a técnica TIPS é uma solução promissora para a produção de pós de PEEK e compósitos de PEEK para manufatura aditiva baseada em leito de pó, como o HT-SLS (Wang *et al.*, 2021).

Quanto as atmosferas de sinterização temos duas condições possíveis: Inerte e reativa, a primeira cumpre a função de não reação com os aços, seus principais meios de aplicação são através de gases nobres ou de vácuo, o $N_2$ é também considerado inerte, porém no caso específico dos aços inoxidáveis pode haver reações com Cromo e Vanádio, na mesma forma que sinterizações ativadas por Boro são dependentes do mesmo. As atmosferas reativas podem ser oxidantes como por exemplos podem ser até às inertes que contenham vapor de água, dióxido de carbono e oxigênio, isso depende principalmente de sua atividade química na fase gasosa, ativada pelo aumento da temperatura na sinterização, a qual pode vir a ser também redutora para materiais menos sensíveis ao oxigênio (Gierl-Mayer, 2020).

Pós de aços ligados com Cromo, como no caso dos inoxidáveis, possuem reações diferenciadas uma vez que esse constituinte altera o comportamento da matriz com o oxigênio, em atmosferas de Argônio há um aumento na temperatura necessária para que haja uma desoxidação superficial das amostras, assim esse processo não tem início antes de temperaturas de 900 a 950°C e ainda não é finalizado antes de 1300°C. Atmosferas de $H_2$, mesmo sendo consideradas inertes, devido a presença de Carbono, iniciam esse processo em temperaturas de 400°C, finalizando somente para óxidos mais estáveis em temperaturas mais elevadas (Gierl-Mayer, 2020).

A sinterização de aços inoxidáveis à vácuo em temperaturas acima de 1200°C, junto a adição de grafite ao pó atomizado a água, pode reduzir os teores de carbono a menos de 300 ppm, o que na prática significa teores de oxigênio inferiores a 0,03%, o que no caso de propriedades mecânicas como a resistência ao impacto, pode representar um aumento de 40%. Em atmosferas mistas de $H_2$ e $N_2$, onde maiores concentrações do primeiro considerando o seu menor ponto de orvalho, produzem também uma redução de óxidos, e ainda o alcance de maiores densidades de compactação também contribuindo nesse sentido, favorecendo o processo de difusão em atmosferas redutoras durante a sinterização, isso pode ser alcançado por um aumento no tempo de sinterização, porém pelos fatores já mencionados não é indicado essa última opção (ASM Handbook, 2007).

A sinterização de aços inoxidáveis em vácuo merece atenção, pois constituintes importantes como o Cromo, possuem pressão de vapor dentro do campo de temperaturas e pressões típicas aos parâmetros usuais, e ainda durante o processo mesmo atmosferas inertes podem ser afetadas por reações do material das amostras ou impurezas presentes no forno. Uma possibilidade de contorno para esses efeitos é através da aplicação de ciclos de aquecimento e evacuação no interior do forno, o que se mostrou eficiente na sinterização dos aços inoxidáveis (Otto, 1974).

O objetivo deste trabalho é investigar os efeitos da temperatura, do tempo de sinterização e da adição de pó de cobre em experimentos de metalurgia do pó convencional, visando a produção de amostras de material à base de aço inoxidável ferrítico 430L. O estudo busca

identificar melhorias nas propriedades físicas, metalúrgicas e mecânicas, além de avaliar a influência desses parâmetros na resistência à compressão das amostras, considerando diferentes teores de pó de cobre e temperaturas de sinterização.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nos experimentos foram pós de aço inoxidável 430L e de cobre eletrolítico, os equipamentos aplicados na rota de fabricação das amostras fazem parte do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Neste capítulo, são detalhados os materiais e métodos utilizados para a condução da pesquisa sobre amostras produzidas por metalurgia do pó convencional, utilizando uma mistura de pós com base no aço inoxidável ferrítico 430L e o aditivo Cobre eletrolítico.

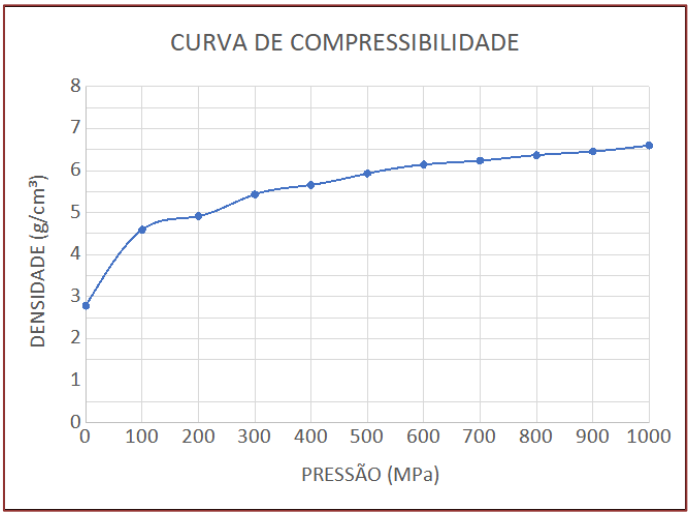
**Figura 5:** Moinho centrífugo modelo PM 100, fabricante Retsch

Fonte: retsch.com

Os pós de aço inoxidável ferrítico e cobre foram caracterizados quanto a distribuição do tamanho de partícula utilizando o equipamento de granulometria laser fabricante Cilas, modelo 1190, o qual se encontra no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM/UFRGS). Os pós foram misturados nas seguintes condições: Sem adição de cobre e com adições nas proporções de 1%, 2%, 5% em massa, no moinho centrífugo, Figura 5, a 250 RPM por 10 minutos. O pó de estearato de zinco foi utilizado como lubrificante e desmoldante aplicado na matriz e punção em todas as condições para melhorar o processo de compactação.

A compactação das misturas de pós foi realizada utilizando uma prensa hidráulica manual Bovenau de 30 toneladas, numa matriz com cavidade cilíndrica fabricada em aço ferramenta AISI H13, foram aplicadas pressões de compactação de 100 MPa a 1000 MPa, por 15 segundos, para formar corpos de prova cilíndricos com dimensões de 13 mm de diâmetro, para produção primeiramente de uma curva de compressibilidade, Gráfico 1, a qual possibilita a escolha da pressão mais adequada para fabricação das amostras a serem sinterizadas. O método de avaliação da densidade das amostras foi o de Arquimedes, utilizando uma balança eletrônica fabricante Ohaus, junto a um dispositivo de fabricação própria com fluído de empuxo álcool isopropílico.

**Gráfico 1:** Curva de compressibilidade das amostras de 430L sem adição de cobre compactadas de 100 MPa até 1000 MPa




Fonte: O Autor.

As amostras compactadas na pressão escolhida de 800 MPa, conforme a melhor condição considerando a curva de compressibilidade e literatura (ASM Handbook, 2007; Gierl-Mayer, 2020). A seguir as amostras foram sinterizadas em um forno resistivo tubular 1500 Sanchis, figura 6, com uma primeira etapa de pré-vácuo em $10^{-2}$ mbar, para limpeza e exaustão, utilizando uma bomba de vácuo fabricante Edwards, modelo 8. Isso em duas temperaturas e patamares de sinterização:

1) condição de sinterização 1250°C, por 30 minutos sob uma atmosfera controlada de gás marrom em pressão relativa de 1 bar, numa taxa de aquecimento de 10°C/min até 1000°C e 5°C/min de 1000°C a 1250°C.

2) condição de sinterização de 1350°C por 60 minutos sob uma atmosfera controlada argônio em pressão relativa de 1 bar, numa taxa de aquecimento de 5°C/min até 500°C e 10°C/min de 500°C a 1350°C.

Ambos os gases utilizados são fornecidos por White Martins com pureza de 5.0, o resfriamento foi conduzido de maneira lenta dentro do próprio forno, evitando assim a formação de trincas, oxidação e deformações nas amostras.

**Figura 6**: Forno resistivo tubular 1500°C Sanchis

Fonte: O Autor.

Após a sinterização, as amostras foram submetidas a análises para determinar suas propriedades como a densidade que foi medida pelo método de Arquimedes, enquanto a porosidade e microestrutura que foram determinadas utilizando microscópio metalográfico invertido modelo GX-51, fabricante Olympus, para análises de imagens de seções transversais das amostras. As análises por microscopia eletrônica de varredura foram realizadas no equipamento Tescan, modelo VEGA 3 LMH, acoplado a um EDS Oxford INCA x-act modelo 51-ADD0007, do Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM/UFRGS), no qual foram produzidos imagens e mapas de composição química por EDS, de amostras atacadas eletroquimicamente com uma diferença de potencial de 5V por 45 segundos em solução de ácido oxálico 10%.

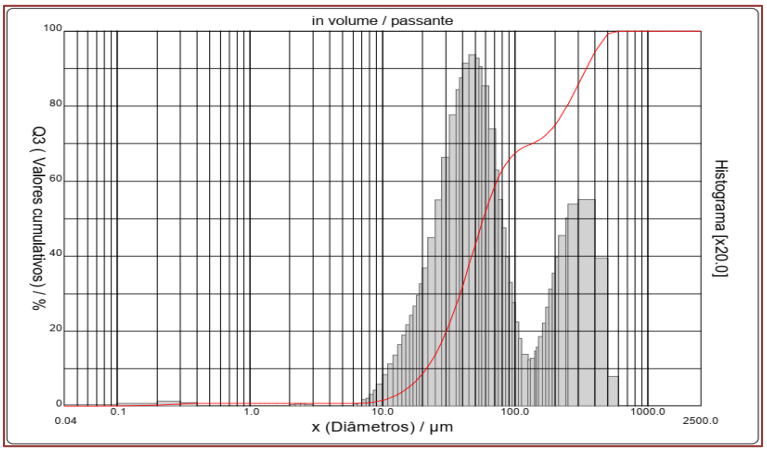
Quanto a porosidade todas amostras foram preparadas com lixas de 200 a 1200 e polidas com pasta diamantada de 3 µm, no caso da análise de microestrutura foi ainda realizado um ataque químico por 60 segundos, utilizando o reagente água régia (1ml de $HNO_3$ + 1,5ml HCl) na proporção de 2% em solução de Álcool Etílico e nas amostras analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi realizado ataque eletrolítico com ácido oxálico 10% em água destilada. As propriedades mecânicas das amostras foram submetidas a ensaios de compressão na máquina universal de ensaios Emic, modelo DL 60000, para determinação da resistência mecânica. Os ensaios foram realizados em matrizes planas com uma velocidade de 5 mm/minuto nas amostras com deslocamento máximo controlado em redução de 60% em altura, utilizando Teflon como lubrificante para redução de atrito entre amostras e bases.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização da matéria-prima quanto a distribuição do tamanho de partículas foi realizada por meio de granulometria laser para os pós de aço inoxidável e cobre, sendo que os resultados para o aço inoxidável 430L podem ser observados no gráfico 2, onde a linha vermelha representa o somatório das classes de tamanhos de partículas apresentadas no histograma, assim nesse caso temos a seguinte distribuição:

- Diâmetro a 10%: 6.85µm;
- Diâmetro a 50%: 26.37µm;
- Diâmetro a 90%: 38.24µm;
- Diâmetro médio: 25.01 µm.

**Gráfico 2:** Distribuição granulométrica pó de aço inoxidável 430L por meio líquido

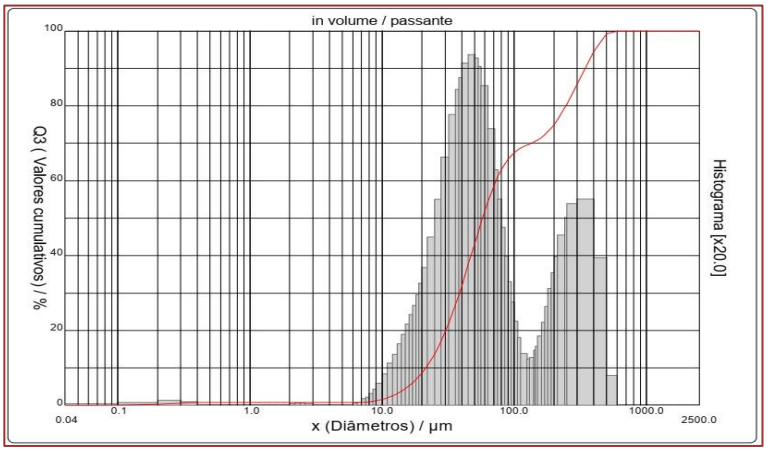



Fonte: O Autor.

O pó de Cobre, gráfico 3, apresentou os seguintes resultados:

- Diâmetro a 10%: 21.39 µm
- Diâmetro a 50%: 57.47 µm
- Diâmetro a 90%: 345.20 µm
- Diâmetro médio: 124.20 µm

**Gráfico 3:** Distribuição granulométrica pó de Cobre por meio líquido




Fonte: O Autor.

A distribuição do tamanho de partícula do pó metálico na metalurgia do pó convencional é um fator crucial que afeta todos os estágios do processo, desde a compactação até a sinterização e as propriedades finais da peça. A escolha da distribuição ideal depende das características desejadas no produto final e dos requisitos do processo, como densidade, resistência, porosidade. Quando existe uma distribuição irregular de tamanhos de partículas essa condição pode ajudar a melhorar a compactação do pó, reduzir porosidade e aumentar a densidade da peça compactada, pois partículas menores podem preencher os espaços entre partículas maiores. Isso pode ser benéfico em muitos casos, como na fabricação de peças mais densas ou com propriedades mecânicas melhores (ASM Handbook, 2007).

Amostras de aço inoxidável 430L verdes compactadas a 800 MPa em diferentes proporções de adição de cobre, tabela 1, demonstraram um aumento na densidade conforme o aumento do aditivo em valores de 6,54 g/cm$^3$ a 6,66 g/cm$^3$, o que apresenta uma grande influência do aditivo nessa etapa de compactação.

**Tabela 1:** Densidade média das amostras verdes e sinterizadas

| Densidade verde (compactada) e marrom (sinterizada) | | |
|---|---|---|
| **Condição** | **Verde (g/cm$^3$)** | **Marrom (g/cm$^3$)** |
| 430L | 6,54 | 6,65 |
| 430L + 1%Cu | 6,56 | 6,64 |
| 430L + 2%Cu | 6,58 | 6,62 |
| 430L + 5%Cu | 6,66 | 6,57 |

Já nas mesmas amostras sinterizadas a 1250°C por 30 minutos, houve uma inversão, onde a condição sem adição de cobre apresentou o melhor resultado de densidade igual a 6,65 g/cm$^3$ e com o maior patamar de adição de 5% em massa, foi o menor valor de 6,57 g/cm$^3$. A adição de cobre durante o processo de sinterização pode ter efeitos significativos na densificação do componente final. A presença de uma fase líquida rica em cobre durante a sinterização pode facilitar o rearranjo das partículas, a dissolução-precipitação e a difusão aprimorada, todos fatores que contribuem para uma densificação melhorada (Maria *et al.*, 2017).

A dissolução da fase líquida rica em cobre na matriz circundante pode levar a uma solução supersaturada, que então se precipita, preenchendo poros e vazios no material. Além disso, a fase líquida pode molhar as superfícies das partículas de pó, melhorando sua capacidade de se rearranjar e se compactar de forma mais eficiente (Bhootpur; Brouwer; Tang, 2023). O aumento do transporte de massa através da fase líquida também pode acelerar a difusão de átomos, aprimorando ainda mais a densificação do material (Bhootpur; Brouwer; Tang, 2023). Entretanto, os resultados obtidos nesta investigação mostram o efeito contrário onde não se obteve um densificação maior nas amostras utilizando a fase líquida. Da mesma forma, alguns estudos também não obtiveram resultados positivos utilizando cobre como fase líquida na sinterização (Ammar; Khalil; Sherif, 2015; Bhootpur; Brouwer; Tang, 2023; Wang *et al.*, 2021; Zhaohui *et al.*, 2008), sugerindo que os parâmetros específicos de processamento e a composição do material devem ser cuidadosamente otimizados para aproveitar plenamente os benefícios da sinterização por fase líquida.

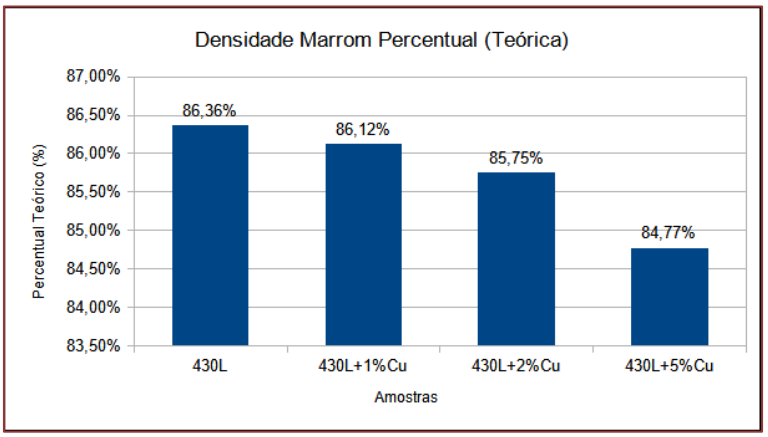
A densidade teórica ideal de sinterização pode ser encontrada abaixo, considerando a densidade dos pós elementares de aço inoxidável 430 e cobre utilizando a equação (1), na

qual é possível calcular o valor ponderado de acordo com a proporção de cada elemento na mistura de pós. Comparando os valores calculados nas amostras sinterizadas a 1250°C por 30 minutos em atmosfera de gás marrom, é possível observar que densidades teóricas e experimentais possuem diferenças na faixa de 15% em favor das ideais quanto às experimentais.

**Tabela 2:** Comparativo de densidades

| Densidade Teórica Ideal de Sinterização – Amostras Sinterizadas a 1250ºC | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Densidade por material (g/cm³)** | | **Condição** | **Ponderada (g/cm³)** | **Marrom (g/cm³)** |
| AISI 430L | 7,7 | 430L | 7,7 | 6,65 |
| | | 430L + 1%Cu | 7,71 | 6,64 |
| Cobre | 8,96 | 430L + 2%Cu | 7,72 | 6,62 |
| | | 430L + 5%Cu | 7,75 | 6,57 |

**Gráfico 4**: Densidade de sinterização 1250°C por 30 minutos (Marrom) x teórica (Ideal)



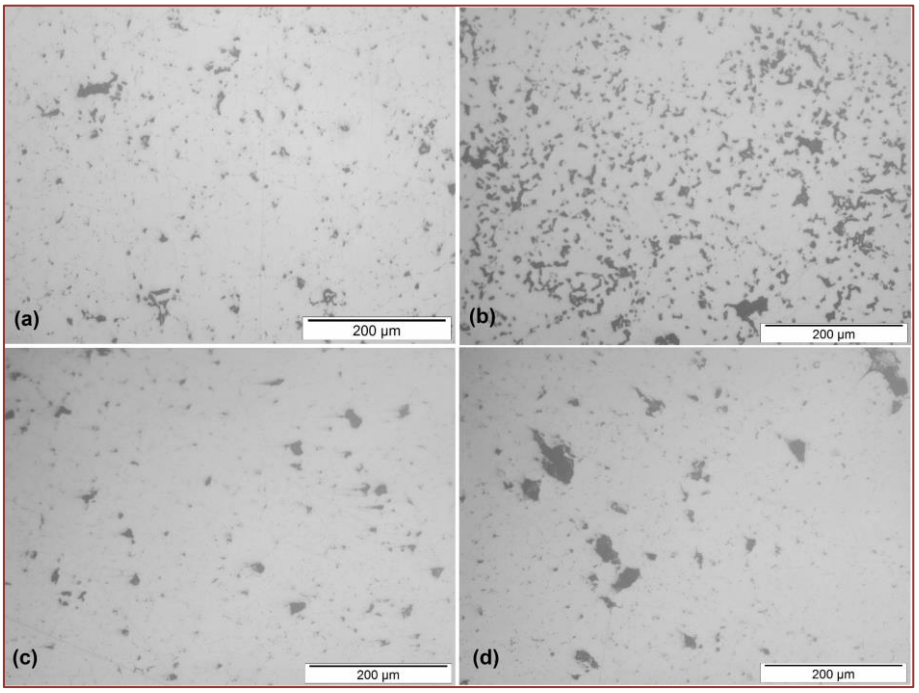

O gráfico 4, demonstra essa relação em percentuais, de forma que o valor mais próximo do ideal que se encontra nas amostras sinterizadas a 1250°C por 30 minutos sem adição de cobre é de 86,36%, porém conforme citado anteriormente mesmo o resultado menor de 84,77% continua numa faixa de aproximadamente 15% de diferença, o que fica dentro do esperado considerando a literatura e que não somente a densidade, mas também outras propriedades devem ser avaliadas quanto aos resultados alcançados durante o experimento.

**Tabela 3:** Comparativo de densidade média verde e marrom em amostras de 430L compactadas com pressão de 800 MPa sem adição de cobre, sinterizadas a 1350°C por 60 minutos em atmosfera de Argônio com pressão relativa de 1 bar

| Densidade verde e densidade marrom – sinterização a 1350°C por 60 minutos | | |
|---|---|---|
| **Condição** | **Densidade (g/cm³)** | **Volume (cm³)** |
| Verde | 6,55 | 1,54 |
| Marrom | 7,22 | 1,39 |

A figura 7, apresenta imagens de porosidade quanto às amostras sinterizadas a 1250°C por 30 minutos, o que pode se perceber é que entre a condição sem adição de cobre, Figura 7a, e com a adição máxima de 5%, há uma diferença na morfologia e quantidade de poros, apresentando na Figura 7d, na qual é possível observar uma menor quantidade de poros, que nesse caso apresentam dimensões maiores, isso se define principalmente pela difusão de cobre na matriz ferrítica durante a sinterização em fase líquida (Uzunsoy, 2007).

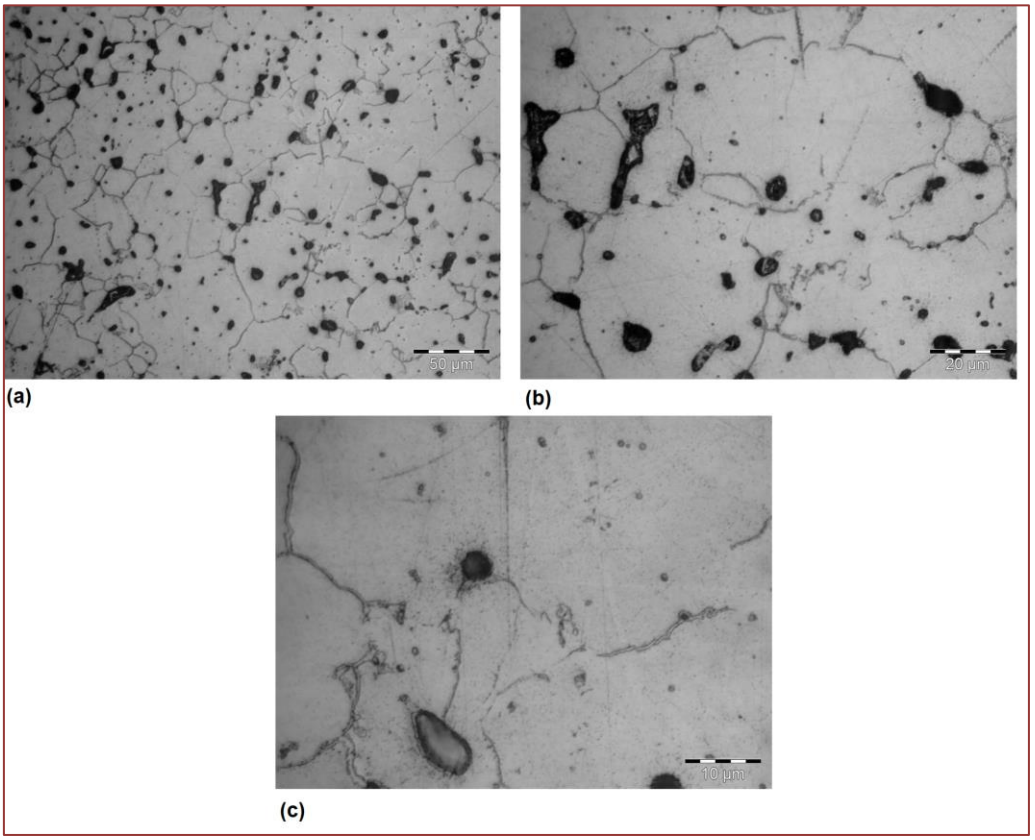
**Figura 7:** Imagens de porosidade amostras sinterizadas a 1250°C por 30 minutos por microscopia óptica: (a) 430L, (b) 430L + 1% de Cu, (c) 430L + 2% de Cu e (d) 430L + 5% de Cu




Análises metalográficas das amostras de 430L sem adição de cobre, sinterizadas a 1350°C por 60 minutos em atmosfera de Argônio, Figura 8, obtidas através de ataque químico com reagente água régia, revelam o tamanho e geometria do grão da matriz ferrítica nessa condição. Pode-se perceber que o processo de sinterização alcançou o mais alto patamar no qual o crescimento do grão vai alterando a morfologia dos poros com a sua realocação quase que sempre na região de contorno de grão, gerando um aumento expressivo de densidade marrom, que pode ser percebido através da tabela 3, na qual fica evidente um ganho entre densidade verde e marrom com uma diminuição de volume expressivo.

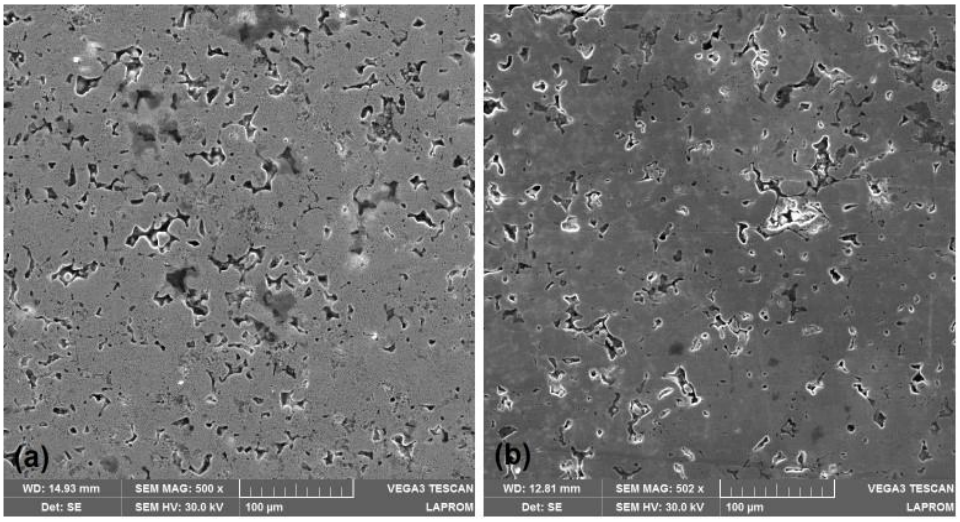
O estudo de (German; Suri; Park, 2009) mostra o mesmo efeito da temperatura de sinterização no crescimento de grão e densificação do material, desta forma a temperatura e taxa de aquecimento na sinterização desempenham um papel crucial na microestrutura do material.

**Figura 8:** Imagens de metalografia de amostras sinterizadas a 1350°C por 60 minutos por microscopia óptica em diferentes ampliações: (a) 200x, (b) 500x e (c) 1000x




Na Figura 9 é apresentada a micrografia obtida por Microscopia eletrônica de varredura de duas condições distintas: (A) sem adição de cobre e (B) com adição de 5% de cobre. Nota-se que a adição de cobre forma uma segunda fase mais escura que é basicamente a dissolução do cobre líquido formado durante a sinterização que reage com o ferro formando essa fase. Consequentemente com a formação da fase líquida durante a sinterização observa-se uma maior densificação se comparada a condição sem adição de cobre (A).

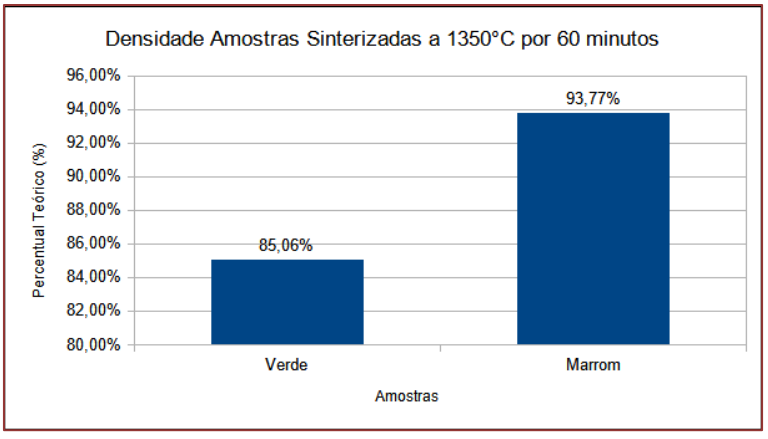
**Figura 9:** Imagens de porosidade em MEV: (a) 430L (b) 430L + 5% de Cu




Fonte: O Autor.

Considerando que as amostras possuem a mesma densidade ideal da condição anterior, pode-se perceber que a diferença entre densidade verde e marrom se intensificou, gráfico 5, uma vez que a verde continua na faixa de menos 15% em relação a ideal, mas as amostras sinterizadas agora apresentam menos de 7% de diferença, o que representa um ganho na densidade marrom que pode ser explicado pela maior temperatura e patamar de sinterização (ASM Handbook, 2007).

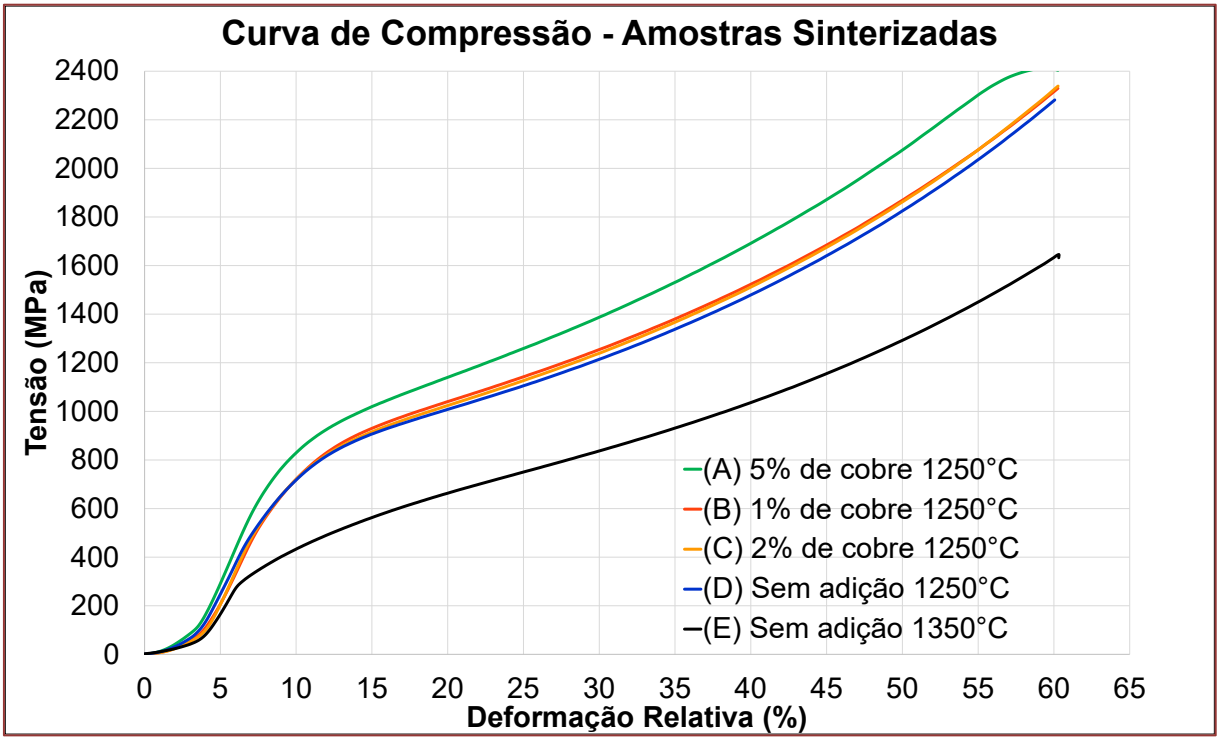
**Gráfico 5:** Comparativo entre densidades com a ideal de amostras compactadas com pressão de 800 MPa e sinterizadas a 1350°C por 60 minutos em atmosfera de Argônio




Analisando os dados dos ensaios de compressão do 430L sinterizado a 1250°C por 30 minutos em atmosfera de gás marrom, apresentados no Gráfico 6, é possível observar que o melhor resultado onde se encontra a maior resistência a compressão está apresentado na curva (A), verificada pela sua maior inclinação, da mesma forma o menor resultado está na curva (E), a qual representa os resultados das amostras do mesmo material sem

adição de cobre sinterizadas na temperatura de 1350°C por 60 minutos em atmosfera de argônio. Adições crescentes de cobre verificadas nas curvas B, C e D, geram um aumento gradativo na resistência à compressão com ápice na condição (D), que representa 5% de cobre em massa, isso pode ser explicado pelos efeitos da sinterização em fase líquida favorecendo transferência de massa entre partículas devido a capilaridade do aditivo, o que incrementa o processo metalúrgico de difusão atômico, ou seja, a criação inicial de pescoços aproximando as partículas até um estágio final de adensamento consolidado que reduz a porosidade das amostras. Os resultados da curva (E) podem ser explicados pela maior temperatura e tempo de sinterização, o que favoreceu a densificação muito pelo aumento do tamanho de grão, o que também acaba por diminuir a resistência mecânica, assim não só a densidade deve ser o objetivo, mas também a resistência das amostras, dependendo isso muito mais da aplicação a qual for empregada os componentes fabricados. Então considerando a resistência mecânica e a densidade, podemos afirmar que quanto maior a resistência e menor a densidade, mais leves e com maior capacidade de suportar os esforços de compressão serão os componentes fabricados por metalurgia do pó (ASM Handbook, 2007).

**Gráfico 6:** Curva de compressão 430L sinterizado em diferentes condições de adições de Cu e temperaturas: (A) 5% de Cu 1250°C, (B) 1% de Cu 1250°C, (C) 2% de Cu 1250°C, (D) Sem adição de Cu 1250°C e (E) sem adição de Cu 1350°C




## 7. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir:

- Ambas as atmosferas e temperaturas de sinterização mostraram-se eficazes no processo de densificação do material. No entanto, a temperatura de 1350°C (a mais

alta) proporcionou uma maior densificação em comparação com as temperaturas inferiores.

- A adição de cobre não teve efeito positivo na densificação do material, independentemente da temperatura de sinterização empregada.
- A análise das curvas de compressão revelou que a presença de cobre no material aumentou tanto a tensão de escoamento quanto o limite de resistência, indicando uma melhoria nas propriedades mecânicas do material devido à adição do metal.
- Observou-se que, mesmo nas amostras com menor densidade, houve um ganho significativo nas propriedades mecânicas, especialmente na resistência à compressão. Esse aumento pode ser atribuído à microestrutura modificada pela adição de cobre, que, apesar de não melhorar a densificação, contribui para o reforço da matriz metálica, melhorando a resistência global do material.

## REFERÊNCIAS

[1] AMMAR, Hany R; KHALIL, Khalil A; SHERIF, El-Sayed M. **Thermally Stable Nanocrystalline Aluminum Alloys Processed by Mechanical Alloying and High Frequency Induction Heat Sintering.** [*s. l.*], v. 9, n. 1, 2015.

[2] ASM HANDBOOK. **Powder Metallurgy Stainless Steels: Processing, Microstructures, and Properties**. EUA: ASM International, 2007. v. 1

[3] BHOOTPUR, Nikhil; BROUWER, Hans; TANG, Yinglu. **Influence of bismuth oxide as a sintering aid on the densification of cold sintering of zirconia**. **Ceramics International**, [*s. l.*], v. 49, n. 21, p. 33495–33499, 2023.

[4] GERMAN, Randall M.; SURI, Pavan; PARK, Seong Jin. **Review: liquid phase sintering**. Journal of Materials Science, [*s. l.*], v. 44, n. 1, p. 1–39, 2009.

[5] GIERL-MAYER, Christian. **Reactions between ferrous powder compacts and atmospheres during sintering – an overview**. Powder Metallurgy, [*s. l.*], v. 63, n. 4, p. 237–253, 2020.

[6] HÖGANAS. **Handbook for Sintered Components. Production of Sintered Components**. Sweden: PM-School HandBook 2, 2013.

[7] MARIA, Jon-Paul *et al.* **Cold sintering: Current status and prospects**. Journal of Materials Research, [*s. l.*], v. 32, n. 17, p. 3205–3218, 2017.

[8] NEVES, Ederson Bitencourt das. **Sinterização De Misturas De Pós Elementares De Uma Liga Fe-22,5Cr-5, 5Ni**. 2015. 99 f. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG, Rio Grande RS, 2015.

[9] OTTO, George. **Vacuum sintering of stainless steel**. Journal of Vacuum Society Technology, EUA, 1974.

[10] UZUNSOY, D. **The characterization of PM 304 stainless steel sintered in the presence of a copper based additive**. Materials Letters, [*s. l.*], v. 61, n. 1, p. 10–15, 2007.

[11] WANG, Yuan *et al.* **Poly ether ketone and its composite powder prepared by thermally induced phase separation for high temperature selective laser sintering**. Materials & Design, [*s. l.*], v. 201, p. 109510, 2021.

[12] ZHAOHUI, Zhang *et al.* **Sintering mechanism of large-scale ultrafine-grained copper prepared by SPS method**. Materials Letters, [*s. l.*], v. 62, n. 24, p. 3987–3990, 2008.

# Capítulo 4

## *Desenvolvimento de um dispositivo portátil para auxílio a deficientes visuais com detecção ultrassônica de obstáculos*

*Anderson de Oliveira Castro Correia*
*Cláudio Júnior Neves Sousa*
*Rafael de Paula Lacerda Pio*

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo vestível para auxiliar deficientes visuais na detecção de obstáculos. O dispositivo, projetado como um colar, utiliza um sensor ultrassônico para medir a distância de objetos à frente do usuário e um *buzzer* para fornecer *feedback* sonoro. Um microcontrolador ESP32 é responsável por integrar os componentes e gerenciar a detecção e sinalização.

Palavras-chave: deficientes visuais, detecção de obstáculos, *buzzer*, microcontrolador ESP32

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, milhões de pessoas em todo o mundo vivem com deficiência visual, enfrentando desafios significativos em sua mobilidade e independência. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que, em 2020, pelo menos 2,2 bilhões de pessoas tinham algum grau de deficiência visual ou cegueira MEC (2024). Para essas pessoas, a navegação segura em ambientes internos e externos é desafiadora, frequentemente exigindo assistência humana ou dispositivos auxiliares, como bengalas ou cães-guia.

Contudo, os dispositivos tradicionais apresentam limitações. Bengalas, por exemplo, são eficazes para detectar obstáculos no chão, mas têm dificuldades em identificar objetos suspensos ou mais distantes. Já os cães-guia, apesar de proporcionarem grande autonomia, têm um custo elevado e demandam cuidados contínuos.

Os avanços recentes em eletrônica e sensores oferecem novas oportunidades para o desenvolvimento de dispositivos de auxílio mais eficientes e acessíveis. Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um colar portátil equipado com sensor ultrassônico e buzzer, controlado por um microcontrolador ESP32. O dispositivo detecta obstáculos à frente do usuário e emite alertas sonoros, permitindo uma navegação mais segura e autônoma.

## 2. DEFICIÊNCIA VISUAL

A visão é um sentido dominante e desempenha papel crítico em todas as fases da vida. Atividades corriqueiras no desenvolvimento do ser humano, como aprender a andar, a ler e a frequentar uma escola, e posteriormente trabalhar, tornam-se muito mais difíceis sem a visão em Saúde (2024). Atualmente, pelo menos 2,2 bilhões de pessoas ao redor do mundo têm deficiência visual, das quais pelo menos 1 bilhão tem deficiência visual que poderia ter sido prevenida ou ainda não foi tratada Organization (2024).

A deficiência visual é a perda ou redução da capacidade visual em ambos os olhos em caráter definitivo, que não pode ser melhorada ou corrigida com o uso de lentes, tratamento clínico ou cirúrgico. Existem critérios rígidos para definir uma deficiência. Portanto, uma pessoa com alto grau de miopia, por exemplo, não é uma pessoa com deficiência visual, uma vez que existem alternativas para correção desta limitação Família (2024).

Classificação dos diferentes graus de deficiência visual:

- Baixa visão (leve, moderada ou profunda): pode ser compensada com o uso de lentes de aumento e lupas com o auxílio de bengalas e de treinamentos de orientação.
- Próximo à cegueira: quando a pessoa ainda é capaz de distinguir luz e sombra, mas já emprega o sistema braile para ler e escrever, utiliza recursos de voz para acessar programas de computador, locomove-se com a bengala e precisa de treinamentos de orientação e de mobilidade.
- Cegueira: o uso do Sistema Braille, da bengala e os treinamentos de orientação e de mobilidade, nesse caso, são fundamentais.

## 3. SENSOR ULTRASSÔNICO - HC-SR04

Das propriedades físicas de medição, a medição de distância é frequentemente a mais importante. A medição de distância é essencial para muitas aplicações, incluindo robôs autônomos, sistemas de estacionamento de veículos, instalações de produção, medição de nível de fluido e muitas outras Aliew (2022).

O HC-SR04 é um dispositivo para medição ultrassônica, bastante utilizado em equipamentos eletromecânicos. Nele, há um circuito de controle, um transmissor e um receptor ultrassônico Nakatani et al. (2014). Segundo o fabricante FREAKS (2024), ele fornece medidas de 20 mm a 4000 mm, cuja precisão pode chegar a 3 mm.

### 3.1. MÉTODO DE MEDIÇÃO DA DISTÂNCIA

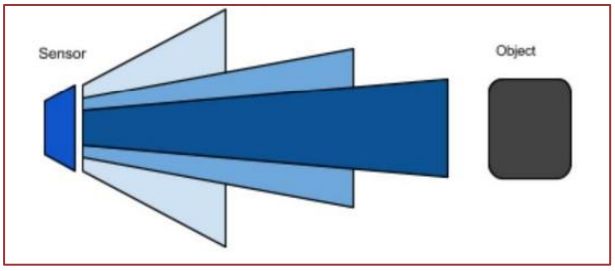
TOF é o tempo que uma onda ultrassônica leva para atingir um obstáculo e retornar. A medição de distância ultrassônica com o método TOF é baseada nos seguintes parâmetros físicos: velocidade do som no ar; fatores ambientais; e tempo de detecção da onda refletida Aliew (2022).

$$D = \frac{V_S \cdot T}{2}$$

A equação 1 ilustra a relação entre esses parâmetros onde D é uma distância a ser medida, V é a velocidade do som e T é o tempo de voo (TOF). A Velocidade do som V é o parâmetro-chave na medição de distância ultrassônica e é sensível a fatores ambientais, como umidade e temperatura.

Deve-se observar que os sensores ultrassônicos possuem um cone de detecção, o ângulo de esse cone varia com a distância, a Figura 1 mostra essa relação. A capacidade de um sensor detectar um objeto também depende da orientação do objeto em relação ao sensor. Se um objeto não apresentar uma superfície plana ao sensor, é possível que a onda sonora rebata no objeto de forma que não retorne ao sensor Morgan (2014).

**Figura 1.** Sensor Ultrassônico




Fonte: Morgan (2014).

## 4. *BUZZER*

Um buzzer é um transdutor que converte sinais elétricos em sons audíveis. Ele geralmente consiste em um cristal piezoelétrico é um sistema de controle. Este dispositivo é utilizado

para sinalização sonora, sendo aplicado em computadores, despertadores, carros, entre outros da Robótica (2023).

Tipos de *Buzzer*:

- *Buzzer* Passivo: O *buzzer* passivo é o tipo mais comum e requer uma fonte externa para produzir sons. Ele é mais simples de usar, pois apenas requer a conexão de dois cabos para funcionar. No entanto, a frequência do som emitido por esse tipo de buzzer não pode ser controlada.
- *Buzzer* Ativo: Nos *buzzer* ativos, a eletrônica interna é capaz de controlar a frequência do som emitido. Isso os torna mais versáteis para várias aplicações, como alarmes, jogos e música.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1. *MICROPYTHON*

*MicroPython* é uma implementação de *Python* projetada para rodar em microcontroladores, desenvolvida em 2013 por Damien George. Focando no *Python* 3.5, *MicroPython* elimina a compatibilidade com versões anteriores. Ele implementa um subconjunto das funcionalidades do *Python*, incluindo bibliotecas de funções e classes que substituem diretamente as bibliotecas padrão, mas são adaptadas às limitações dos microcontroladores, como memória, suporte de hardware e velocidade Ionescu and Enescu (2020).

### 5.2. ESP32

O ESP32 é uma plataforma poderosa e econômica para o desenvolvimento de aplicativos de IoT. O ESP32, desen- volvido pela Espressif Systems Company (Xangai, China), oferece uma combinação poderosa de recursos e capacidades para aplicativos de IoT Hercog et al. (2023).

**Figura 2.** Placa ESP32 ESP-WROOM-32

Fonte: Próprio Autor.

O ESP32 pode ser programado usando várias estruturas e linguagens de desenvolvimento. A linguagem de programação mais comumente usada é C++, e pode ser programado usando o Arduino IDE ou PlatformIO.

O ESP32 é equipado com um microprocessador Tensilica (Santa Clara, CA, EUA) Xtensa LX6 dual-core, que fornece maior poder de processamento e facilita a multitarefa e a execução eficiente de tarefas complexas Hercog et al. (2023).

## 5.3. FONTE DE ALIMENTAÇÃO

A fonte de energia é um powerbank Duracell de 6700mAh (3), que fornece uma saída de 5V para a alimentação do sistema.

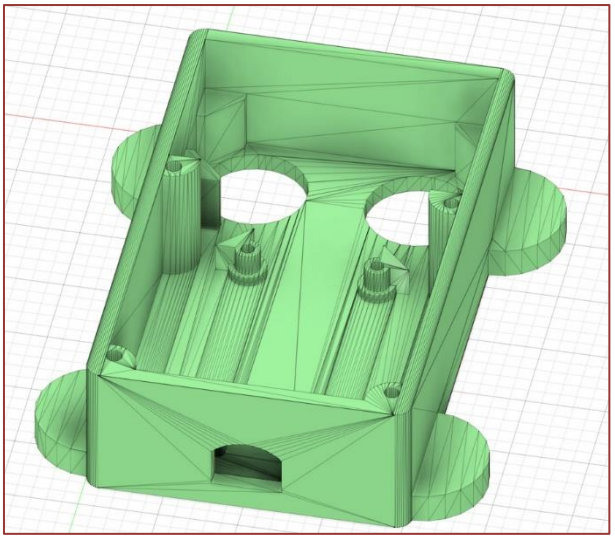
**Figura 3.** *Powerbank*

Fonte: Próprio Autor.

## 5.4. *CASE* DO SISTEMA

Para abrigar todo o circuito e os componentes, foi utilizada uma case (4) projetada com o software Fusion 360 da AutoDesk. O design da case foi customizado para garantir uma organiza¸c˜ao eficiente e uma prote¸c˜ao adequada de todos os elementos do sistema.

**Figura 4.** Case protetora

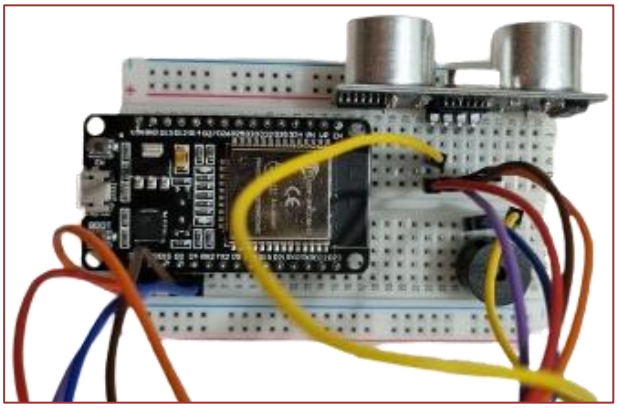


Fonte: Próprio Autor.

## 6. MONTAGEM DO SISTEMA

Inicialmente, o sistema foi montado em uma protoboard (7) para realizar testes e garantir o funcionamento adequado do circuito. Nessa etapa, utilizou-se apenas o microcontrolador e o sensor de distância para testar o código e assegurar que as leituras feitas pelo sensor estavam corretas. Esta fase foi crucial para identificar e corrigir possíveis erros antes da montagem final.

**Figura 5.** Circuito montado na protoboard



Fonte: Próprio Autor.

## 7. PROCEDIMENTO DE TESTE

O protótipo foi testado em diversos cenários para avaliar sua eficácia na detecção de obstáculos e na comunicação de alertas ao usuário. Os testes foram realizados em ambientes internos e externos, com diferentes tipos de obstáculos, como paredes, móveis

e pessoas em movimento. O desempenho do dispositivo foi avaliado com base na precisão das medições de distância e na clareza dos sinais sonoros emitidos pelo *buzzer*.

## 7.1. METODOLOGIA DE TESTE

(1) Calibração do Sensor Ultrassônico: Antes de iniciar os testes, o sensor ultrassônico foi calibrado usando uma trena para garantir a precisão das medições.

(2)Teste de Precisão de Medição: Em ambientes internos, o sensor foi testado com obstáculos colocados a distâncias pré-determinadas de 10 cm a 80 cm. Em ambientes externos, obstáculos similares foram colocados, e as medições foram registradas para avaliar a precisão do sensor em condições variáveis de luz e temperatura.

(3)Teste de Resposta do Buzzer: O dispositivo foi posicionado em frente a um obstáculo, e a resposta do buzzer foi monitorada. Diferentes variações de alerta sonoro foram testadas para distâncias variáveis (70 cm, 60 cm, 50 cm, etc.) para garantir que as mudanças na frequência fossem perceptíveis e intuitivas para o usuário.

(4)Teste de Usuário em Ambiente Controlado: Voluntários vendados participaram dos testes em um ambiente controlado. Eles foram instruídos a caminhar em direção a obstáculos enquanto usavam o dispositivo.

## 8. MONTAGEM FINAL DO PROTÓTIPO

Após a realização dos testes preliminares e a validação do funcionamento básico do sistema na protoboard, a montagem final do protótipo foi realizada. Nessa etapa, o objetivo foi consolidar o sistema em uma versão mais robusta e compacta, adequada para uso prático e possíveis testes em condições reais.

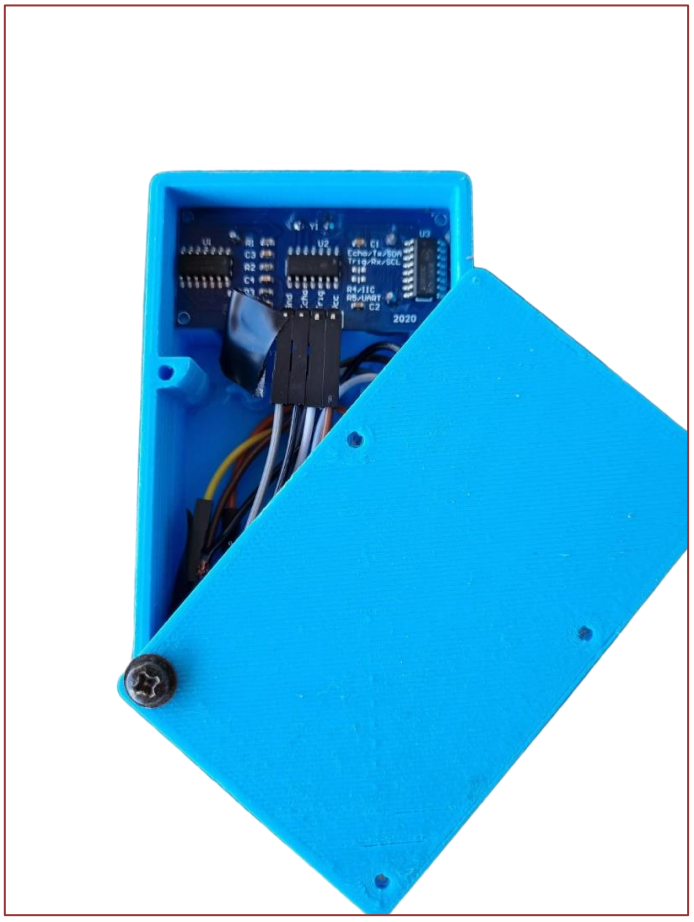
**Figura 6.** Protótipo Montado (Parte Frontal)

Fonte: Próprio Autor.

## 8.1. TESTES PÓS-MONTAGEM E AJUSTES FINAIS

Após a montagem final, o sistema foi novamente testado para garantir que todas as conexões estavam corretas e que o comportamento do protótipo não havia sido alterado. Realizou-se uma série de testes para verificar o desempenho do sensor de distância, bem como a resposta do microcontrolador e a estabilidade da alimentação elétrica. Durante essa fase, também foram feito ajustes no código e na calibração do sensor para otimizar o desempenho após a implementação dos sensores no protótipo.

**Figura 7.** Protótipo Montado (Parte Traseira)



Fonte: Próprio Autor.

## 9. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos testes indicam que o dispositivo vestível é eficaz, embora apresente limitações relacionadas ao campo de detecção do sensor ultrassônico. Em alguns casos, o sensor não detectou objetos muito estreitos ou com superfícies irregulares, devido à dispersão das ondas ultrassônicas. Essa limitação resultou em alguns falsos negativos, onde obstáculos não foram identificados corretamente. Uma possível melhoria envolve a adição de múltiplos sensores ultrassônicos posicionados em ângulos diferentes, cobrindo uma área maior e reduzindo os pontos cegos.

## 10. CONCLUSÃO

Em conclusão, o dispositivo vestível desenvolvido é uma ferramenta promissora para auxiliar deficientes visuais na detecção de obstáculos, aumentando sua segurança e independência. Apesar das limitações observadas, como falhas ocasionais na detecção devido ao campo de detecção do sensor ultrassônico, os resultados gerais foram positivos. As melhorias sugeridas, incluindo a adição de feedback vibratório, a utilização de múltiplos sensores e a implementação de algoritmos de filtragem de ruídos, têm o potencial de aumentar ainda mais a eficácia do dispositivo.

## REFERÊNCIAS

[1] Aliew, F. (2022). An approach for precise distance measu- ring using ultrasonic sensors. Engineering Proceedings, 24(1), 8.

[2] da Robótica, C. (2023). Buzzer: o que é e como utilizar no seu projeto de robótica. https://blog.casadarobotica.com/buzzer-o-que-e-e-como-utilizar-no-seu-projeto-de-robotica/ [Acessado em 27 de Julho de 2024].

[3] em Saúde, B.V. (2024). 13/12 – dia nacional da pessoa com deficiência visual. https://bvsms.saude.gov.br/13-12-dia-nacional-da-pessoa-com-deficiencia-visual/#:~:text=Defici\%C3\%AAncia\%20visual\%20pode\%20ser\%20definida,vis\%C3\%A3o\%20para\%20executar\%20algumas\%20tarefas. [Acessado em 26 de Julho de 2024].

[4] FAMÍLIA, S.D.D.S.E. (2024). Deficiência visual. https://www.desenvolvimentosocial.pr.gov.br/Pagina/Deficiencia-Visual [Acessado em 26 de Julho de 2024].

[5] FREAKS, E. (2024). Ultrasonic ranging module hc - sr04. https://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/HCSR04b.pdf [Acessado em 26 de Julho de 2024].

[6] Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., and Težak, O. (2023). Design and implementation of esp32-based iot devices. Sensors, 23(15), 6739.

[7] Ionescu, V.M. and Enescu, F.M. (2020). Investigating the performance of micropython and con esp32 and stm32 microcontrollers. In 2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 234–237. IEEE.

[8] MEC (2024). Data reafirma os direitos das pessoas com deficiência visual. https://encurtador.com.br/cueL9 [Acessado em 24 de Julho de 2024].

[9] Morgan, E.J. (2014). Hc-sr04 ultrasonic sensor. Nov.

[10] Nakatani, A.M., Guimarães, A.V., and Neto, V.M. (2014). Medição com sensor ultrassônico hc-sr04. In Inter- national Congress on Mechanical Metrology. Gramado, volume 3.

[11] Organization, W.H. (2024). Relatório mundial sobre a visão. https://www.who.int/publications/i/item/ world-report-on-vision [Acessado em 26 de Julho de 2024].

# Capítulo 5

## *Aplicação de ferramentas Lean Manufacturing na redução de perdas em processos produtivos metalúrgicos*

*Renan Lima Cagliari*
*Diego José Casagrande*

Resumo: A aplicação de ferramentas *Lean Manufacturing* tem se mostrado eficaz na redução de perdas e otimização de processos produtivos, especialmente na indústria metalúrgica de peças de alumínio. O alumínio, material amplamente utilizado em diversos setores, requer processos produtivos eficientes para minimizar desperdícios e maximizar a qualidade do produto final. Neste contexto, este estudo possui como objetivo realizar uma revisão de literatura sobre a implementação de ferramentas *Lean Manufacturing* na indústria de alumínio, analisando os seus impactos na redução de perdas e melhorias na eficiência produtiva. O método utilizado foi uma revisão bibliográfica descritiva e qualitativa, com a coleta de artigos e trabalhos acadêmicos publicados entre 2015 e 2023. As bases de dados utilizadas incluíram Scielo, Google Scholar e CAPES Periódicos, com foco em publicações que abordassem metodologias Lean aplicadas à produção de alumínio. Os resultados da revisão indicaram que as ferramentas *Lean*, como 5S, Kaizen, *Just-in-Time* e DMAIC, contribuíram para a redução de refugo, retrabalho e otimização do uso de materiais e energia. Além disso, a implementação dessas metodologias mostrou-se eficaz na melhoria contínua dos processos produtivos e no aumento da sustentabilidade industrial. Conclui-se que a aplicação das ferramentas *Lean Manufacturing* é uma estratégia vantajosa para a indústria de alumínio, proporcionando ganhos em eficiência e competitividade, além de reduzir impactos ambientais e operacionais.

Palavras-chave: *Lean Manufacturing,* produção de alumínio, redução de perdas, eficiência produtiva, sustentabilidade industrial.

## 1. INTRODUÇÃO

A competitividade crescente no setor industrial exige práticas que aumentem a eficiência produtiva, reduzam desperdícios e melhorem a qualidade dos produtos. Nesse cenário, o *Lean Manufacturing* tem se destacado como uma metodologia relevante para a otimização dos processos produtivos, particularmente na indústria metalúrgica. A produção de peças de alumínio, devido às suas propriedades como leveza, resistência à corrosão e alta reciclabilidade, é beneficiada pela aplicação dessas ferramentas, que auxiliam na redução de perdas ao longo do processo produtivo (Carvalho; Catapan; Cruz, 2018).

A aplicação do *Lean Manufacturing* em processos metalúrgicos, especialmente na produção de peças de alumínio, envolve ferramentas como o 5S, o *Just-in-Time* (JIT) e o *Kaizen*, que visam identificar e eliminar sete tipos de desperdícios: superprodução, espera, transporte, processamento excessivo, inventário, movimentação desnecessária e defeitos. Quando aplicadas de forma eficaz, essas ferramentas não apenas melhoram a eficiência, mas também reduzem custos e aumentam a produtividade, sem comprometer a qualidade final do produto (Tabosa, 2021).

Além de promover eficiência, a indústria metalúrgica enfrenta desafios específicos, como o consumo elevado de energia, a geração de resíduos e a necessidade de alta precisão em processos como fundição e tratamento de superfícies de alumínio. Nesse contexto, práticas de manufatura enxuta são fundamentais para reduzir refugos e retrabalhos, minimizando desperdícios de materiais e aumentando a eficiência energética. Estudos demonstram que a aplicação do *Lean Manufacturing* em processos de extrusão de alumínio resultou na redução significativa de índices de refugo e retrabalho, com impactos positivos na sustentabilidade econômica e ambiental do setor (Siqueira, 2021).

A produção de peças de alumínio inclui várias etapas, como fundição, laminação, extrusão e usinagem, cada uma com desafios técnicos e operacionais próprios. A aplicação de ferramentas Lean pode ser essencial para identificar gargalos em cada etapa, promovendo a melhoria contínua. A fundição de alumínio, por exemplo, é particularmente sensível à variabilidade de parâmetros como temperatura e tempo de resfriamento, que podem afetar a qualidade do produto final. Nesse sentido, o *Kaizen*, focado em melhorias incrementais, pode ajudar na identificação e correção dessas variabilidades, evitando defeitos e retrabalhos (Furtado, 2017).

Além da redução de perdas produtivas, a aplicação do *Lean Manufacturing* também traz benefícios para a gestão de recursos humanos e materiais na indústria de alumínio. A metodologia Lean valoriza o engajamento dos trabalhadores e a eliminação de processos desnecessários, criando um ambiente de trabalho mais eficiente e colaborativo. Isso melhora tanto a segurança quanto o desempenho dos operadores, reduzindo erros humanos e acidentes de trabalho (Chaves et al., 2018). A padronização dos processos, associada à análise constante de dados produtivos, permite que as empresas ajustem rapidamente suas operações, mantendo a competitividade e a qualidade do produto final.

Outro aspecto importante da aplicação do *Lean Manufacturing* na metalurgia do alumínio é seu impacto na sustentabilidade. O alumínio é um dos materiais mais reciclados do mundo, e as ferramentas Lean podem otimizar ainda mais esse processo de reciclagem, minimizando o desperdício de materiais e o consumo de energia. A reciclagem de alumínio consome cerca de 95% menos energia do que a produção a partir da bauxita, o que torna a eficiência operacional e a redução de perdas aspectos cruciais para a competitividade da indústria (Chaves et al., 2018). Dessa forma, o uso do *Lean Manufacturing* não apenas

melhora a eficiência produtiva, mas também promove práticas sustentáveis, cada vez mais demandadas no mercado global.

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, tem se destacado como uma tecnologia complementar à manufatura subtrativa nos processos de produção de peças de alumínio. Enquanto a subtrativa remove material para criar a peça final, a aditiva adiciona material camada por camada, gerando menos desperdício. Quando combinada com os princípios Lean, a manufatura aditiva pode reduzir substancialmente os desperdícios e o tempo de produção (Pereira, 2019). Embora ainda esteja em fase de desenvolvimento para grandes volumes, seus impactos na redução de perdas são notáveis em pequenas produções e peças com geometria complexa.

Diante desses pontos, a produção de peças de alumínio na indústria metalúrgica enfrenta desafios constantes, tanto em eficiência quanto em sustentabilidade. A redução de perdas é essencial para manter a competitividade e garantir o uso eficiente de recursos como materiais e energia. A adoção de ferramentas *Lean Manufacturing* pode ser uma estratégia eficaz para mitigar esses desafios, ao identificar e eliminar desperdícios em diferentes estágios do processo produtivo. Além disso, essas ferramentas contribuem para a melhoria contínua, permitindo que as empresas alcancem níveis mais altos de desempenho sem comprometer a qualidade ou a sustentabilidade (Mesquita; Carvalho; Ogando, 2016).

Por fim, a busca por processos mais eficientes e sustentáveis torna imprescindível a adoção de práticas que reduzam perdas no processo produtivo de peças de alumínio. O alumínio se destaca como um material essencial no mercado global, devido às suas propriedades como leveza e durabilidade, sendo amplamente utilizado em setores como a indústria automotiva, aeroespacial e de embalagens. Com isso, compreender a aplicação eficaz das ferramentas *Lean Manufacturing* é fundamental para otimizar a produção metalúrgica e melhorar a competitividade no mercado (Soares, 2015).

Este artigo teve como objetivo realizar uma revisão de literatura sobre a aplicação de ferramentas *Lean Manufacturing* na redução de perdas no processo produtivo de peças de alumínio na indústria metalúrgica, avaliando os benefícios, desafios e possíveis melhorias operacionais decorrentes da implementação dessas metodologias.

No decorrer deste trabalho, serão apresentadas as principais ferramentas do *Lean Manufacturing* e suas aplicações na indústria de peças de alumínio. A seção de desenvolvimento abordará os métodos utilizados, incluindo a revisão bibliográfica, e discutirá os resultados da implementação dessas metodologias. Em seguida, os impactos dessas ferramentas na redução de perdas, eficiência produtiva e sustentabilidade serão analisados detalhadamente. Por fim, as considerações finais sumarizarão os principais achados, destacando os benefícios e desafios da adoção das práticas Lean na metalurgia do alumínio.

## 2. DIMENSÕES DO *LEAN MANUFACTURING* NA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO

A aplicação de ferramentas *Lean Manufacturing* na indústria de alumínio tem demonstrado impactos significativos na redução de perdas, aumento de eficiência e promoção da sustentabilidade nos processos produtivos. O Lean, conhecido por focar na eliminação de desperdícios, melhoria contínua e envolvimento dos colaboradores, tem sido amplamente implementado em diversos setores, incluindo a metalurgia. As

indústrias de produção de alumínio possuem características específicas que podem ser otimizadas através dessas ferramentas, como exemplificado por diversos autores.

Tabosa (2021) destaca que a implementação da metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) foi fundamental para identificar gargalos e melhorar os processos em uma indústria multinacional de embalagens de alumínio. A abordagem DMAIC permitiu uma análise detalhada das causas de variabilidade nos processos de fundição e extrusão, levando à redução de defeitos e maior eficiência geral.

Carvalho, Catapan e Da Cruz (2018) discutem a aplicação de metodologias Lean em uma empresa metalúrgica, focando na redução de desperdício de chapas de aço, cujas lições são aplicáveis ao alumínio. A redução de desperdícios e a melhoria no aproveitamento das chapas resultaram em custos de produção menores e melhor desempenho ambiental, especialmente quando associadas ao 5S e ao Kaizen.

Chaves et al. (2018) ressaltam os benefícios da reciclagem de alumínio, enfatizando que o uso de ferramentas Lean maximiza a eficiência e promove a sustentabilidade ao reduzir o consumo de energia e incentivar o reaproveitamento de materiais. A reciclagem de alumínio, que consome 95% menos energia do que a produção a partir da bauxita, reforça o impacto positivo das práticas Lean na indústria.

Soares (2015) aborda a variabilidade nos processos produtivos como um dos principais desafios da eficiência na indústria metalúrgica, sugerindo o *Just-in-Time* (JIT) como uma solução eficaz para alinhar a produção com a demanda em tempo real, eliminando estoques intermediários e melhorando a eficiência do processo. O JIT, ao evitar excesso de estoque e reduzir tempos de produção, é particularmente útil para a indústria de alumínio, que envolve várias etapas produtivas.

Furtado (2017) demonstra que a combinação da filosofia Lean com inovações como a utilização de escória reciclada no alumínio pode otimizar significativamente os processos. A metodologia Kaizen, voltada para a melhoria contínua, facilita a inovação ao promover ajustes incrementais que aumentam a produtividade e minimizam desperdícios.

Siqueira (2021) discute a aplicação de ferramentas como 5S e Kaizen na extrusão de alumínio, evidenciando que a redução de refugos e retrabalhos é diretamente ligada à melhoria contínua. A participação ativa dos operadores no processo de otimização foi um dos principais fatores de sucesso da implementação do Lean, destacando a importância de envolver todos os níveis da equipe.

Nascimento (2017) traz uma importante discussão sobre a eficiência energética, afirmando que a produção de alumínio, intensiva em energia, pode ser otimizada pela aplicação de Lean Manufacturing. A metodologia Lean permite reduzir significativamente o consumo de energia ao otimizar processos como fundição e tratamento térmico, essenciais para a indústria de alumínio.

Mesquita, Carvalho e Ogando (2016) enfatizam a integração de inovações tecnológicas com os princípios Lean, sugerindo que a combinação de automação e controle de qualidade em tempo real pode ser facilitada por uma cultura Lean. Ao priorizar a redução de desperdícios e a eficiência, as indústrias de alumínio podem se beneficiar dessas inovações.

Pereira (2019) explora as diferenças entre manufatura aditiva e subtrativa, destacando que a aditiva, ao construir camada por camada, gera menos desperdício, o que, combinado

com Lean, pode otimizar ainda mais a produção de alumínio. A aplicação do JIT e 5S nesse contexto reduz desperdícios e tempos de produção.

Finalmente, Da Silva Cruz e Botelho (2023) discutem como ferramentas Lean, como o DMAIC, podem melhorar a qualidade e a produtividade em processos de soldagem, cujas lições se aplicam à indústria de alumínio, especialmente em processos de fundição e extrusão, onde a precisão é crucial.

## 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica descritiva e qualitativa, com o objetivo de compilar e analisar as principais contribuições teóricas e empíricas relacionadas à aplicação de ferramentas *Lean Manufacturing* na redução de perdas em processos produtivos na indústria metalúrgica de peças de alumínio. A revisão foi conduzida de acordo com uma abordagem sistemática, buscando garantir a inclusão de estudos relevantes e atualizados, publicados em bases de dados acadêmicas e fontes reconhecidas na área de gestão de produção e metalurgia.

Inicialmente, foram definidos os critérios de inclusão e exclusão dos materiais. Foram considerados artigos científicos, dissertações, teses e trabalhos de conclusão de curso publicados entre os anos de 2015 e 2023, escritos em português ou inglês, que abordassem a aplicação de metodologias Lean em processos produtivos de peças de alumínio ou temas correlatos. Os materiais que tratavam de outros setores industriais ou que não estivessem diretamente relacionados ao tema proposto foram excluídos. As bases de dados consultadas incluíram Scielo, Google Scholar, CAPES Periódicos, e a base de dados da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM).

A busca pelos materiais foi realizada utilizando as seguintes palavras-chave: "Lean Manufacturing", "redução de perdas", "processo produtivo", “metalurgia” e “alumínio”. Foram também utilizados termos correlatos, como "eficiência produtiva" e "desperdício na produção de alumínio", para garantir a abrangência da pesquisa.

A análise qualitativa dos dados foi feita a partir da leitura e interpretação dos resultados encontrados nos artigos selecionados. A metodologia descritiva permitiu a categorização dos diferentes tipos de perdas identificadas nos processos produtivos, bem como a descrição das ferramentas Lean mais utilizadas na indústria metalúrgica, como 5S, Just-in-Time (JIT) e Kaizen. Além disso, foi possível identificar os benefícios e desafios da implementação dessas ferramentas em empresas que produzem peças de alumínio, considerando aspectos como redução de refugos, retrabalho, e aumento da eficiência energética.

Os resultados obtidos foram organizados de forma a descrever as diferentes aplicações das ferramentas *Lean Manufacturing* na indústria metalúrgica de alumínio, evidenciando as estratégias mais eficazes para a diminuição de perdas e os impactos dessas práticas tanto no contexto produtivo quanto na sustentabilidade do setor. Essa abordagem qualitativa permitiu uma interpretação mais profunda dos fenômenos estudados, proporcionando uma visão detalhada dos desafios enfrentados pela indústria metalúrgica ao adotar práticas de manufatura enxuta.

Dessa forma, a metodologia empregada buscou não apenas compilar a literatura existente sobre o tema, mas também analisar criticamente os estudos encontrados, destacando as

contribuições e lacunas na aplicação de ferramentas Lean no setor metalúrgico de alumínio.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta revisão bibliográfica demonstram que a aplicação de ferramentas *Lean Manufacturing* na indústria metalúrgica, especialmente no setor de produção de peças de alumínio, proporciona ganhos significativos em termos de eficiência, redução de desperdícios e otimização de recursos. As ferramentas Lean, quando implementadas de forma adequada, permitiram a redução de perdas em diferentes fases do processo produtivo, como fundição, extrusão e usinagem. Essas ferramentas se mostraram particularmente eficazes na mitigação de defeitos, redução de retrabalho e melhoria no uso de energia e materiais, contribuindo para a sustentabilidade operacional e ambiental.

### 4.1. APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS *LEAN* NO PROCESSO PRODUTIVO DE ALUMÍNIO

A primeira fase da implementação de Lean Manufacturing nas indústrias de alumínio analisadas envolveu o uso da ferramenta 5S, que se mostrou fundamental na organização e padronização do ambiente produtivo. De acordo com os estudos revisados, o 5S permitiu a redução de desperdícios relacionados à movimentação e armazenamento inadequado de materiais, além de melhorar o tempo de setup das máquinas. A aplicação dessa ferramenta resultou em uma melhor gestão de estoques e maior eficiência no controle de materiais.

**Tabela 1 -** Benefícios da Aplicação da Ferramenta 5S na Produção de Peças de Alumínio

| Benefício | Descrição | Impacto na Produção (%) |
|---|---|---|
| **Redução de Tempo de Setup** | Melhoria na organização do espaço e redução do tempo de ajuste de máquinas | 15% |
| **Melhoria no Controle de Estoques** | Organização de estoques e eliminação de materiais obsoletos | 12% |
| **Aumento da Segurança** | Espaços mais seguros para operadores, com riscos reduzidos | 10% |

Fonte: Tabosa (2021).

Os resultados demonstram que o 5S foi responsável por uma redução de até 15% no tempo de setup das máquinas, o que, por sua vez, aumentou a eficiência global do processo produtivo. Além disso, a melhoria na organização dos estoques reduziu perdas de materiais e otimizou o fluxo de trabalho. Essas melhorias indicam que a implementação dessa ferramenta não só aumenta a produtividade, mas também melhora a segurança e o ambiente de trabalho.

### 4.2. IMPACTO DO KAIZEN NA MELHORIA CONTÍNUA E REDUÇÃO DE DEFEITOS

A implementação do Kaizen – uma metodologia que promove a melhoria contínua por meio de pequenos ajustes incrementais – foi amplamente utilizada nas empresas analisadas. Estudos indicam que a aplicação do Kaizen na metalurgia do alumínio contribuiu para a redução de defeitos durante o processo de fundição e extrusão. Os

operadores foram incentivados a identificar problemas e propor soluções, o que aumentou a qualidade das peças produzidas e reduziu significativamente a necessidade de retrabalho.

**Tabela 2 -** Redução de Defeitos e Retrabalho com a Aplicação do Kaizen

| Etapa do Processo | Defeitos Antes do Kaizen (%) | Defeitos Após o Kaizen (%) | Redução de Defeitos (%) |
|---|---|---|---|
| **Fundição** | 8% | 4% | 50% |
| **Extrusão** | 6% | 3% | 50% |
| **Tratamento Térmico** | 5% | 2.5% | 50% |

Fonte: Furtado (2017).

Conforme ilustrado na Tabela 2, o uso do Kaizen proporcionou uma redução média de 50% nos defeitos observados em etapas críticas do processo, como fundição, extrusão e tratamento térmico. Essa redução contribuiu para uma diminuição significativa dos custos associados ao retrabalho, além de elevar os níveis de qualidade dos produtos finais. A participação ativa dos operadores no processo de melhoria contínua se revelou um dos fatores-chave para o sucesso do Kaizen, reforçando a importância do engajamento da equipe na identificação e solução de problemas.

## 4.3. REDUÇÃO DE REFUGOS E RETRABALHO COM *JUST-IN-TIME* (JIT)

A adoção do *Just-in-Time* (JIT) se mostrou eficiente na otimização do fluxo de produção e na redução de estoques intermediários, uma vez que as peças eram produzidas conforme a demanda, reduzindo assim o tempo de espera e os custos associados ao armazenamento. Estudos apontaram que a implementação do JIT em empresas de metalurgia de alumínio resultou em uma redução de até 20% nos níveis de refugo, uma vez que a produção passou a ser ajustada de acordo com as especificações imediatas do cliente, minimizando o risco de superprodução e defeitos.

**Tabela 3 -** Impacto do *Just-in-Time* (JIT) na Redução de Refugos e Estoques

| Indicador | Antes do JIT | Após o JIT | Redução (%) |
|---|---|---|---|
| **Refugos (%)** | 12% | 9.5% | 20% |
| **Estoques Intermediários** | 18 dias | 12 dias | 33% |
| **Custo de Armazenamento** | R$ 50.000 | R$ 35.000 | 30% |

Fonte: Soares (2015).

A aplicação do JIT permitiu uma significativa redução nos níveis de refugos, como mostra a Tabela 3. Além disso, a otimização dos estoques intermediários resultou em uma diminuição de 33% no tempo de estocagem, o que, consequentemente, levou à redução de custos operacionais. O JIT também teve impacto positivo na agilidade da produção, uma vez que a empresa passou a trabalhar com menores volumes de peças, mas com maior frequência de entregas. Isso resultou em uma maior flexibilidade e capacidade de resposta às demandas dos clientes.

## 4.4. DESAFIOS E LIMITAÇÕES DA IMPLEMENTAÇÃO DE FERRAMENTAS *LEAN*

Embora os benefícios da aplicação das ferramentas *Lean Manufacturing* sejam evidentes, os estudos revisados também identificaram desafios e limitações na implementação dessas metodologias na indústria de peças de alumínio. A principal dificuldade relatada pelas empresas foi a resistência à mudança por parte dos operadores e gestores, especialmente em ambientes que já adotavam práticas tradicionais há muitos anos. Além disso, a adaptação de certas ferramentas Lean, como o *Just-in-Time*, à realidade específica do setor metalúrgico nem sempre foi bem-sucedida devido à variabilidade na demanda e aos altos custos iniciais de implementação.

Outro desafio identificado foi a necessidade de treinamento contínuo dos operadores, para que eles pudessem não apenas adotar as ferramentas Lean, mas também participar ativamente do processo de melhoria contínua. Estudos apontam que empresas que investiram em capacitação e cultura organizacional obtiveram melhores resultados na redução de perdas e otimização de processos (Nascimento, 2017). Entretanto, empresas que não deram a devida atenção à formação de seus colaboradores enfrentaram maiores dificuldades na implementação de mudanças e na obtenção de resultados consistentes.

## 4.5. IMPACTO NA SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Outro aspecto relevante identificado foi o impacto positivo da aplicação das ferramentas Lean na sustentabilidade e eficiência energética das empresas metalúrgicas de alumínio. A redução de desperdícios de materiais e energia, especialmente nas etapas de fundição e tratamento térmico, contribuiu para a diminuição da pegada ecológica da produção de peças de alumínio. Além disso, a otimização dos processos produtivos permitiu uma melhor reutilização de materiais reciclados, tornando o ciclo de produção mais sustentável (Chaves et al., 2018).

Empresas que adotaram práticas Lean também relataram uma redução significativa no consumo de energia, especialmente nas etapas de fundição, onde a otimização dos parâmetros de temperatura e tempo de resfriamento resultou em uma maior eficiência. Essas melhorias contribuíram para a redução dos custos operacionais, além de posicionarem as empresas de forma mais competitiva em um mercado cada vez mais voltado para a sustentabilidade e responsabilidade ambiental.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de ferramentas *Lean Manufacturing* na indústria metalúrgica, especificamente no setor de produção de peças de alumínio, mostrou-se uma estratégia eficaz para a redução de perdas e otimização dos processos produtivos. A partir da revisão bibliográfica realizada, foi possível identificar que a adoção de metodologias como 5S, Kaizen, *Just-in-Time* e DMAIC contribui para a melhoria contínua das operações, garantindo maior eficiência e qualidade, além de reduzir custos operacionais.

A indústria de alumínio, por suas características específicas, enfrenta desafios relacionados à alta demanda de energia e materiais, bem como à necessidade de minimizar o refugo e o retrabalho. Nesse contexto, as ferramentas Lean desempenham um papel fundamental ao proporcionar uma maior organização, padronização e controle sobre os processos produtivos. O uso dessas metodologias auxilia as empresas a eliminar

desperdícios, tanto de materiais quanto de tempo, resultando em um ambiente de produção mais enxuto e eficiente.

Além dos benefícios relacionados à eficiência, a aplicação de práticas Lean na produção de alumínio também está alinhada com as demandas contemporâneas por sustentabilidade. A otimização do uso de materiais, especialmente em um contexto em que o alumínio é amplamente reciclado, contribui diretamente para a redução do impacto ambiental das operações industriais. A combinação de eficiência energética e sustentabilidade torna as ferramentas Lean um recurso valioso para a indústria metalúrgica, que busca não apenas atender às exigências do mercado, mas também contribuir para a economia circular.

Entretanto, a implementação das ferramentas Lean exige um comprometimento contínuo de toda a organização, desde os operadores até os gestores. A cultura de melhoria contínua deve ser fomentada, garantindo que todos os envolvidos no processo produtivo participem ativamente da identificação de problemas e na busca por soluções. Além disso, é necessário que as empresas invistam em capacitação e treinamento de seus colaboradores, de modo que eles compreendam a importância e a aplicação correta das metodologias Lean.

Dessa forma, conclui-se que as ferramentas *Lean Manufacturing*, quando corretamente implementadas, oferecem um caminho promissor para a indústria de produção de peças de alumínio. Elas não apenas aumentam a competitividade das empresas no mercado global, mas também contribuem para um futuro mais sustentável e eficiente. É essencial que as empresas continuem investindo na inovação e na melhoria contínua de seus processos, garantindo assim a longevidade e o sucesso em um mercado cada vez mais competitivo e exigente.

## REFERÊNCIAS

[1] AMORIM, R. F. et al. **Desenvolvimento de sistema para gerenciamento de estoque de ferramentas de corte**. 2023.

[2] BENTES, F. M.; DAS NEVES, D. B.; DE OLIVEIRA FERREIRA, F. Viabilidade técnica e econômica na mudança do processo de fundição: estudo de caso em uma indústria de metais sanitários. **Projectus**, v. 8, n. 1, p. 1-29, 2023.

[3] CARVALHO, D. R.; CATAPAN, D. C.; DA CRUZ, J. A. Proposta para redução do desperdício de chapas de aço em uma empresa do ramo metalúrgico. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 1, p. 2-30, 2018.

[4] CHAVES, C. A. et al. Benefícios da reciclagem de materiais: o caso do alumínio. **Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo**, v. 3, n. 3, p. 111-134, 2018.

[5] DA SILVA CRUZ, J.; BOTELHO, L. R. Redução de vazamento em tubulação de ar-condicionado em uma empresa no Pólo Industrial de Manaus: estudo de caso para melhorar a produtividade e qualidade na soldagem. **Gestão da Produção Industrial em Tópicos**, Volume 2, p. 59.

[6] FURTADO, N. S. **Preparação e caracterização do compósito de liga de alumínio AA6061 reforçado com diferentes concentrações de escória de alto forno a coque metalúrgico via metalurgia do pó**. 2017.

[7] KOCH, L. P. M. **Estudo da otimização do cabo metálico na produção de Bowden Cables**. 2022. Tese (Doutorado) – Instituto Politecnico do Porto, Portugal.

[8] LANNES, Q. L. L. C.; LANNES, W. Estilos de liderança e sua dinâmica no comportamento social virtual dos grupos de um programa de ensino a distância. **Ensino e Aprendizagem como Unidade Dialética**, p. 149, 2019.

[9] MESQUITA, P. P. D.; CARVALHO, P. S. L.; OGANDO, L. D. **Desenvolvimento e inovação em**

**mineração e metais**. 2016.

[10] NASCIMENTO, P. G. M. **Eficiência energética na indústria: estudo de caso em uma empresa metalúrgica**. 2017.

[11] PEREIRA, J. V. S. **Análise comparativa da Manufatura Aditiva frente a subtrativa à luz do Lean Manufacturing**. 2019.

[12] SIQUEIRA, N. L. A. **Análise de medidas para redução de refugo e retrabalho em uma empresa de extrusão de alumínio**. 2021.

[13] SOARES, R. O. **Análise da capacidade produtiva de uma empresa do segmento metalúrgico**. 2015.

[14] TABOSA, G. S. **Aplicação da metodologia DMAIC para melhoria de processos em uma indústria multinacional do ramo de embalagens de alumínio**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso.

[15] VIEIRA, M. V. F. et al. Manutenção em redutores de velocidade: um estudo de caso para aumentar a disponibilidade física. **Gestão da Manutenção Industrial e Mineração**, Volume 1, p. 25.

# Capítulo 6

## *Análise de sistema de medição em R: estudo exploratório do pacote SixSigma*

*Olga Maria Formigoni Carvalho Walter*
*Elisa Henning*
*Leandro Zvirtes*

Resumo: A variabilidade de um produto não é explicada somente pela variação de suas medidas, mas também pela variação do sistema de medição ao qual é submetido. O *Measurement System Analysis* (MSA) estuda os fatores que podem levar às variações nos resultados das medições e fornece subsídio para tomada de decisão, focando em equipamento, procedimento, ambiente e executor. Esta pesquisa tem como objetivo explorar a análise de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) do pacote *SixSigma* versão 0.11.0, do *software* R/RStudio, um *software* estatístico gratuito. Este é um estudo exploratório em que os argumentos da função para análise de R&R do pacote *SixSigma* são explorados por meio de um exemplo aplicado a dados disponíveis de literatura clássica da área de Controle Estatístico da Qualidade (CEQ). Conclui-se que o pacote *SixSigma* permite análise completa de R&R, podendo explorar diferentes cenários alterando os argumentos da função específica para tal finalidade. O pacote *SixSigma* ainda mostra nos resultados de sua aplicação as mesmas informações e relatórios, presentes em *softwares* comerciais de CEQ. Além disso, existe a possibilidade de seu uso como ferramenta auxiliar no ensino de CEQ, para ampliar o embasamento teórico no tema, bem como ampliar seu uso por aqueles cujos recursos para aquisição de *softwares* comerciais são escassos.

Palavras-chave: controle estatístico da qualidade, repetibilidade, reprodutibilidade, R&R, pacote *SixSigma*, R/*RStudio*.

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre as várias análises realizadas no Controle Estatístico da Qualidade (CEQ), uma delas é o *Measurement System Analysis* (MSA), uma técnica estatística que determina a variação existente em um sistema de medição. Ou seja, a variabilidade de um produto não é explicada somente pela variação de suas medidas, mas também pela variação do sistema de medição ao qual é submetido (Vieira, 2014).

O MSA consiste em estudar todos os fatores que podem levar às variações nos resultados das medições. O conhecimento sobre os erros, desvios e fatores que contribuem na variabilidade do sistema de medição, fornece subsídio para tomada de decisão em relação a um determinado produto, focando em equipamento de medição, procedimento, ambiente e executor. Outra importante contribuição do MSA, diz respeito a prevenção de não conformidades, favorecendo uma cultura organizacional focada na avaliação e prevenção, e consequentemente, excelência na entrega de produtos e prestação de serviços de qualidade.

O uso de tecnologias como *softwares*, vem sendo empregado cada vez mais em todas as áreas e também em sala de aula como ferramenta auxiliar no processo de ensino e aprendizagem, nas mais diversas áreas do conhecimento. A tecnologia desempenha um papel fundamental na criação e transformação do conhecimento (Dewi *et al*., 2024) e é essencial para ampliar as possibilidades no processo de ensino e de aprendizagem.

Ao usar tecnologias como recursos computacionais pedagógicos, é possível incentivar a habilidade de investigação e ampliar a reflexão mediante uma situação problema. Além disso, as tecnologias estimulam o desenvolvimento do raciocínio lógico, à medida que estudantes podem levantar hipóteses, fazer inferências e tirar conclusões a partir dos resultados apresentados (Jucá, 2006). Ademais, oferece vantagens como menos tempo para cálculos matemáticos (Toledo; Lizarelli; Santana Junior, 2017). Especificamente com relação ao RStudio, Cardoso, Sturion e Sturion (2021) apontam que as tecnologias podem auxiliar o processo de ensino e aprendizagem dos alunos nos conceitos de estatística, permitindo melhor manipulação dos dados e facilitação dos cálculos.

O desenvolvimento de *softwares* de CEQ, pode ser considerado um processo recente (Alhassan; Jawawi, 2014; Furtado, 2020), dificultando, de certa forma, o acesso pago por estes *softwares* comerciais por estudantes, instituições públicas e profissionais liberais. Assim, o uso de *softwares* livres é uma alternativa para resolver este problema, uma vez que *softwares* livres de fácil acesso pode ser uma ferramenta para o sucesso no aprendizado em sala de aula (Silva *et al*., 2019).

Uma breve consulta no *site* do *software* comercial Minitab de CEQ, por exemplo, mostra que seus principais clientes, são grandes empresas de marcas reconhecidas, inclusive internacionalmente (Cummins, Bobcat, Xerox, Basf, Crayola, etc.) (Minitab, 2024a), detentoras de recursos suficientes para aquisição de *softwares* pagos.

Pesquisas relacionadas ao ensino de CEQ utilizando o RStudio como ferramenta pedagógica são escassas tanto no contexto nacional quanto no internacional. No entanto, o emprego do *software* RStudio como ferramenta pedagógica no ensino de disciplinas que envolvem estatística em diferentes áreas é recorrente na literatura, conforme atestam algumas publicações (Vendramini *et al*., 2011; Stander; Valle, 2017; Moura; Silva, 2020).

Nesse contexto, pressupõe-se que o RStudio também pode ser utilizado como ferramenta pedagógica auxiliar no ensino de CEQ. O R é uma linguagem e um ambiente para computação estatística. É um projeto *open source*, baseado no conceito de *software* livre e

pode ser usado sem custos de licença, tanto por estudantes quanto por universidades. Possui versões para diferentes sistemas operacionais e está em constante evolução devido a sua atualização permanente.

É importante ressaltar que o uso da linguagem R é simplificada quando usada em uma *Integrated Development Environment* (IDE), como o RStudio. Rexer, Gearan e Allen (2015) identificaram que 62% dos usuários de R migraram para a *interface* RStudio, sendo o ambiente de desenvolvimento mais popular entre os usuários de R.

Considerando o suporte que tecnologias como *softwares* fornecem no processo de ensino e aprendizagem, e também a facilidade na condução na aplicação de MSA que técnicas estatísticas sofisticadas podem proporcionar, este artigo tem como objetivo explorar a análise de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) do pacote *SixSigma* versão 0.11.1, do *software* gratuito RStudio, que facilita seu uso por estudantes, instituições públicas e profissionais da área da qualidade.

## 2. REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição ideal seria aquele que produzisse somente resultados que coincidissem com o valor verdadeiro da grandeza medida. Porém, o processo de medição resulta em medições com erros e com incerteza (Costa; Epprecht; Carpinetti, 2018). Nesse sentido, um sistema de medição precisa ser gerenciado, para como mostra a Figura 1, identificar quanto que cada causa de variabilidade no processo de medição corresponde ao processo de produção, aos instrumentos de medida, aos operadores, as mudanças de ambiente, etc.

**Figura 1 –** Fontes de erros no processo de medição

Fonte: Os autores (2024).

### 2.1. ESTUDO DE REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE PELO MÉTODO DA MÉDIA E AMPLITUDE

A variabilidade total de um sistema de medição $\sigma^2_{total}$, presente na característica da qualidade medida é dada pela Equação 1 (Montgomery, 2016; Costa; Epprecht; Carpinetti,

2018):

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{peça} + \sigma^2_{medição} \quad (1)$$

onde $\sigma^2_{peça}$ é a variância inerente do processo produtivo devido a causas aleatórias (e também a causas especiais que estiverem presentes) e $\sigma^2_{medição}$ é a variância inerente à medição. A variância inerente à medição é composta por duas parcelas e é dada pela Equação 2 (Montgomery, 2016; Costa; Epprecht; Carpinetti, 2018):

$$\sigma^2_{medição} = \sigma^2_{repetibilidade} + \sigma^2_{reprodutibilidade} \quad (2)$$

onde $\sigma^2_{repetibilidade}$ é a variância decorrente do dispositivo de medição; de resultados de medições sucessivas, quando um mesmo operador mede a mesma peça, usando o mesmo instrumento de medida mais de uma vez, ou seja, sob as mesmas condições de medição. E $\sigma^2_{reprodutibilidade}$ é a variância dos resultados de medições de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição, como diferentes operadores. As estimativas de $\sigma^2_{repetibilidade}$ e $\sigma^2_{reprodutibilidade}$ são dadas pelas Equações 3 e 4, respectivamente (Montgomery, 2016).

$$\hat{\sigma}^2_{repetibilidade} = \frac{\bar{\bar{R}}}{d_2} \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}^2_{reprodutilidade} = \frac{\bar{R}_{\bar{\bar{x}}}}{d_2} \quad (4)$$

onde $\bar{\bar{R}}$ é a média aritmética das amplitudes médias dos diferentes operadores que fazem a medição e $\bar{R}_{\bar{\bar{x}}}$ é a amplitude das médias das médias das medições. O valor de $d_2$ é tabelado e na Equação 3 depende da quantidade de repetições (mensurações) e na Equação 4, $d_2$ depende do número de operadores (Montgomery, 2016). Logo, a estimativa do erro de medição é dada por (5).

$$\hat{\sigma}^2_{medição} = \hat{\sigma}^2_{repetibilidade} + \hat{\sigma}^2_{reprodutibilidade} \quad (5)$$

A estimativa da capacidade do sistema de medição pode ser expressa por (6) (Costa; Epprecht; Carpinetti, 2018).

$$R\&R = 6\hat{\sigma}_{medição} = 6\sqrt{\hat{\sigma}^2_{repetibilidade} + \hat{\sigma}^2_{reprodutibilidade}} \quad (6)$$

A classificação quanto a adequabilidade de um sistema de medição ocorre por meio da análise do %R&R. Quando %R&R ≤ 10 o sistema é classificado como adequado; caso 10 < %R&R ≤ 30, o sistema pode ser adequado dependendo da importância da aplicação, do custo do instrumento, do custo de manutenção etc.; e o sistema é considerado inadequado, ou seja, precisa de melhorias quando %R&R > 30 (Vieira, 2014; Costa; Epprecht; Carpinetti, 2018).

Considerando a faixa de tolerância do projeto, que é a diferença entre o limite superior de

especificação (LSE) e o limite inferior de especificação (LIE), define-se pela Equação 7, a razão da precisão para a tolerância (PT) (Montgomery, 2016; Costa; Epprecht; Carpinetti, 2018).

$$\frac{P}{T} = \frac{6\hat{\sigma}_{medição}}{LSE - LIE} \quad (7)$$

Se $\frac{P}{T}$ é no máximo 0,1 implica em capacidade adequada do medidor (Montgomery, 2016).

## 2.2. ESTUDO DE REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE POR ANOVA

O modelo de *Analisys of Variance* (ANOVA) com dois fatores e interação está sumarizado pela Equação 8 (Montgomery, 2016).

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + O_j + PO_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (8)$$

com $i$ = 1, ..., $p$; $j$ = 1, ..., $o$; $k$ = 1, ..., $n$ e $i$ indica peça; $j$ representa o operador; e $k$ indica a medida tomada.

A análise da variância faz três testes estatísticos, associados as seguintes hipóteses nulas:

1. $H_0^{(P)}$: $P_1 = P_2 = P_3 = ... = P_p = 0$ ⇒ não há diferença no valor esperado da resposta nos $p$ níveis deste fator (as medidas das peças são iguais).
2. $H_0^{(O)}$: $O_1 = O_2 = O_3 = ... = O_o = 0$ ⇒ não há diferença no valor esperado da resposta nos $o$ níveis deste fator (o resultado das medições pelos diferentes operadores é igual).
3. $H_0^{(PO)}$: $PO_{ij} = 0$, para algum $i, j$ ⇒ não há interação entre fatores peça e operador.

Suponha que as variáveis aleatórias $P_i$, $O_j$, $PO_{ij}$ e $\epsilon_{ijk}$ sejam distribuídas normalmente, com média zero e variâncias dadas por $\sigma_p^2 + \sigma_o^2 + \sigma_{po}^2 + \sigma^2$, respectivamente. Temos então que a variância de qualquer observação é expressa pela Equação 9 (Montgomery, 2016).

$$VAR(Y_{ijk}) = \sigma_p^2 + \sigma_o^2 + \sigma_{po}^2 + \sigma^2 \quad (9)$$

em que $\sigma_p^2 + \sigma_o^2 + \sigma_{po}^2 + \sigma^2$ são os componentes da variância que se deseja estimar.

A soma de quadrados (SQ) total é composta pela partição da variabilidade total nas medidas nas componentes sumarizadas na Equação 10.

$$SQ_{Total} = SQ_P + SQ_O + SQ_{PxO} + SQ_{Erro} \quad (10)$$

Em que $SQ_P$ é a soma de quadrados das peças, $SQ_O$ é a soma de quadrados referente ao fator operador, $SQ_{PxO}$ é a soma de quadrados da interação peça-operador e $SQ_{Erro}$ é a soma de quadrados dos erros.

Cada soma de quadrados no membro direito da equação é dividida pelos seus graus de liberdade, conforme as Equações 11 a 14 (Montgomery, 2016).

$$QM_P = \frac{SQ_{Peças}}{p-1} \quad (11)$$

$$QM_O = \frac{SQ_{Operadores}}{o-1} \quad (12)$$

$$QM_{PO} = \frac{SQ_{PxO}}{(p-1)(o-1)} \quad (13)$$

$$QM_{Erro} = \frac{SQ_{Erro}}{po(n-1)} \quad (14)$$

Pode-se mostrar que os valores esperados das médias quadráticas são expressos por 15, 16, 17 e 18, respectivamente (Montgomery, 2016).

$$E(QM_P) = \sigma^2 + n\sigma^2_{PO} + on\sigma^2_P \quad (15)$$

$$E(QM_O) = \sigma^2 + n\sigma^2_{PO} + pn\sigma^2_O \quad (16)$$

$$E(QM_{PO}) = \sigma^2 + n\sigma^2_{PO} \quad (17)$$

$$E(QM_{Erro}) = \sigma^2 \quad (18)$$

Os componentes da variância podem ser estimados igualando-se, a seus valores esperados, os valores das médias quadráticas, de acordo com as Equações 19, 20, 21 e 22.

$$\hat{\sigma}^2 = QM_E \quad (19)$$

$$\hat{\sigma}^2_{PO} = (QM_{PO} - QM_E)/n \quad (20)$$

$$\hat{\sigma}^2_O = (QM_O - QM_{PO})/pn \quad (21)$$

$$\hat{\sigma}^2_P = (QM_P - QM_{PO})/on \quad (22)$$

Se não houver interação entre operador e peça, ou seja, $\sigma^2_{PO} = 0$, então temos o modelo reduzido de acordo com o exposto na Equação 23.

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + O_j + \epsilon_{ijk} \quad (23)$$

## 3. ESTUDOS CORRELATOS

### 3.1. METODOLOGIA

Esta é uma pesquisa exploratória e investiga o uso do pacote *SixSigma* versão 0.11.0 (Cano; Moguerza; Redchuk, 2012) do *software* estatístico R (R Core Team, 2024), na análise de sistemas de medição, especificamente na análise de R&R. Para melhor entendimento da análise de R&R, é utilizada uma função específica do pacote *SixSigma* disponível para tal finalidade, em que seus argumentos são explorados por meio de um exemplo aplicado a dados disponíveis de literatura da área de CEQ.

Os dados utilizados são provenientes do experimento de Houf e Berman (1988), estão disponíveis também em Montgomery (2016) e são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 –** Dados para análise de R&R

| | Operador 1 | | | Operador 2 | | | Operador 3 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Peças | Medidas | | | Medidas | | | Medidas | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 37 | 38 | 37 | 41 | 41 | 40 | 41 | 42 | 41 |
| 2 | 42 | 41 | 43 | 42 | 42 | 42 | 43 | 42 | 43 |
| 3 | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 29 | 30 | 28 |
| 4 | 42 | 43 | 42 | 43 | 43 | 43 | 42 | 42 | 42 |
| 5 | 28 | 30 | 29 | 29 | 30 | 29 | 31 | 29 | 29 |
| 6 | 42 | 42 | 43 | 45 | 45 | 45 | 44 | 46 | 45 |
| 7 | 25 | 26 | 27 | 28 | 28 | 30 | 29 | 27 | 27 |
| 8 | 40 | 40 | 40 | 43 | 42 | 42 | 43 | 43 | 41 |
| 9 | 25 | 25 | 25 | 27 | 29 | 28 | 26 | 26 | 26 |
| 10 | 35 | 34 | 34 | 35 | 35 | 34 | 35 | 34 | 35 |

Fonte: Montgomery (2016).

O conjunto de dados é composto por 90 medidas, e trata-se de impedância térmica (°C/Watt × 100) em um módulo de potência para um arranque de motor de indução, onde há dez peças ($p$ = 10), três operadores ($o$ = 3) e três medidas por peça ($n$ = 3). O limite inferior de especificação (LIE) e o limite superior de especificação (LSE) são 18°C/W × 100 e 58°C/W × 100, respectivamente (Montgomery, 2016).

Inicialmente os argumentos da função `ss.rr()` do pacote *`SixSigma`* apresentados na Tabela 2 da próxima seção, foram analisados e explorados por dois pesquisadores. Posteriormente, participaram da condução e construção da aplicação dos exemplos usando a função `ss.rr()` mais outro pesquisador. Esse processo levou 20 dias. Depois, os resultados das aplicações foram analisados em conjunto com os três pesquisadores do estudo. Os recursos utilizados foram três computadores com sistema operacional Windows com instalação atualizada do *software* R e IDE RStudio.

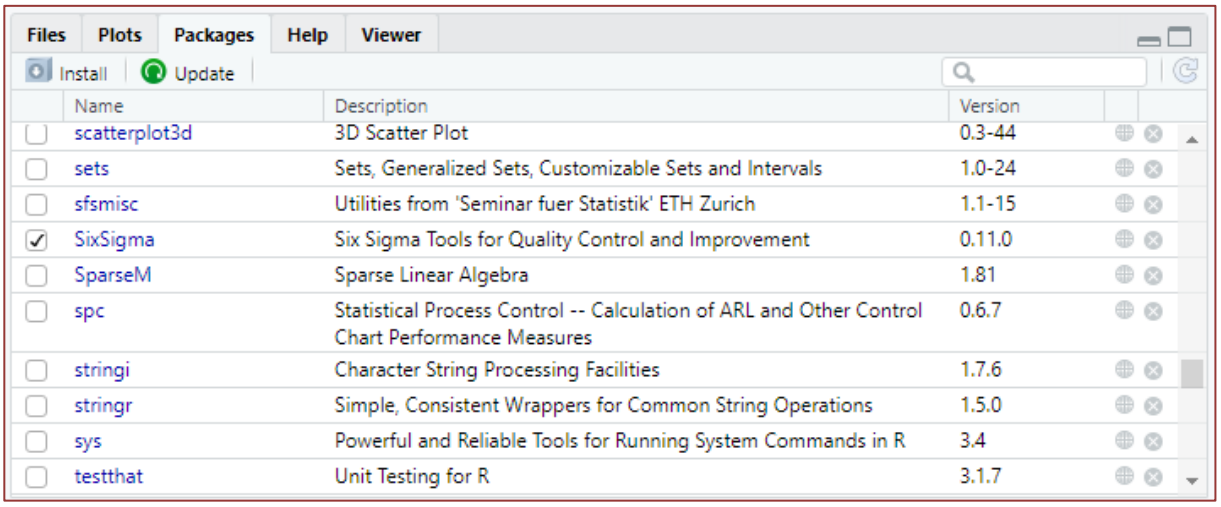
Com relação as diretrizes utilizadas para garantir os resultados desta pesquisa, cada pesquisador explorou a função `ss.rr()` de forma isolada, ou seja, sem contato com os outros pesquisadores; e depois os resultados obtidos foram discutidos com os demais pesquisadores e finalmente, os resultados apresentados pelo *software* foram comparados com os disponíveis em Montgomery (2016).

Os comandos do R utilizados no exemplo, se executados na sequência como indicada neste documento, reproduzirão o mesmo resultado aqui apresentado, proporcionando replicação da prática deste estudo.

## 4. ANÁLISE DE R&R COM O PACOTE *SIXSIGMA*

Após instalação do pacote pelo Console por meio do comando `install.packages("SixSigma")`, ou pelo menu *Tools/Install Packages*, é preciso ativar o pacote *SixSigma* com o comando `library(SixSigma)` ou `require(SixSigma)`. Outra forma de ativar o pacote é selecionando-o na guia *Packages*, conforme mostra a Figura 2.

**Figura 2 –** Ativação do pacote *SixSigma* pela guia *Packages* do RStudio




Fonte: Os autores (2024).

## 4.1. LEITURA DO CONJUNTO DE DADOS

Depois de ativar o pacote, os dados podem ser lidos diretamente pelo Console via digitação dos dados por meio dos comandos da Figura 3(a). Onde `Medicoes` é a variável que contém as medidas das peças. Note que a primeira linha da Figura 3(a) são as três primeiras medições (Tabela 1) feias pelo operador 1, as próximas três medições são do operador 2 e as últimas três medições são do operador 3, todas referentes a primeira peça. A segunda linha corresponde as medições da segunda peça feita pelos três operadores, e assim sucessivamente.

**Figura 3a –** Conjunto de dados do exemplo

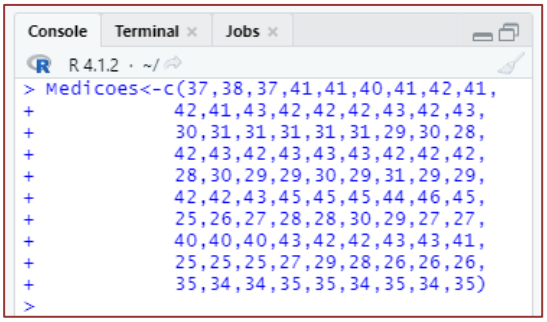
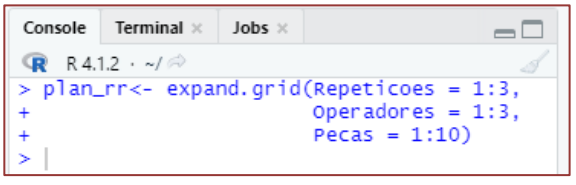



**Figura 3b –** Organização do experimento




Fonte: Os autores (2024).

Na sequência os dados são organizados, por meio da função expand.grid() como mostra a Figura 3(b). Onde plan_rr é o objeto *dataframe* que contém os dados do planejamento, ou seja, o número de repetições, a quantidade de operadores e a quantidade de peças. O próximo passo, é incluir as medições da variável Medicoes no objeto plan_rr por meio do comando plan_rr$Medicoes <- Medicoes. O resultado é apresentado na Figura 4(a). Outra forma de fazer a leitura dos dados, é importar para o RStudio os dados de planilha eletrônica pela aba *Environment* do RStudio, em *Import Data Set/From Excel...* como mostra a Figura 4(b).

**Figura 4a -** Conjunto de dados

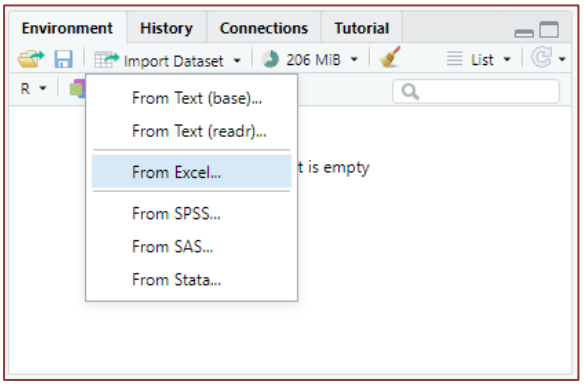
plan_rr | Untitled5* | Untitled3* | Untitled9*

Filter

| | Repeticoes | Operadores | Pecas | Medicoes |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 37 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 38 |
| 3 | 3 | 1 | 1 | 37 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 41 |
| 5 | 2 | 2 | 1 | 41 |
| 6 | 3 | 2 | 1 | 40 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 41 |
| 8 | 2 | 3 | 1 | 42 |
| 9 | 3 | 3 | 1 | 41 |
| 10 | 1 | 1 | 2 | 42 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 41 |
| 12 | 3 | 1 | 2 | 43 |
| 13 | 1 | 2 | 2 | 42 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 42 |
| 15 | 3 | 2 | 2 | 42 |

Showing 1 to 15 of 90 entries, 4 total columns

**Figura 4b -** Importação por planilha eletrônica Excel

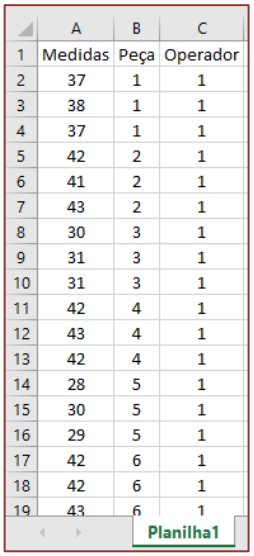



Fonte: Os autores (2024).

Na sequência, para importar os dados, selecionar a planilha eletrônica que contém as medições, no diretório do computador.

A planilha eletrônica deve estar com os dados dispostos como mostra a Figura 5. Onde a primeira coluna são as medidas das peças; a segunda coluna indica o número da peça que foi medida; e a terceira coluna denota o operador que executou a medição da peça.

**Figura 5 -** Recorte da disposição dos dados de planilha eletrônica a ser importado para o R/RStudio



| | A | B | C |
|---|---|---|---|
| 1 | Medidas | Peça | Operador |
| 2 | 37 | 1 | 1 |
| 3 | 38 | 1 | 1 |
| 4 | 37 | 1 | 1 |
| 5 | 42 | 2 | 1 |
| 6 | 41 | 2 | 1 |
| 7 | 43 | 2 | 1 |
| 8 | 30 | 3 | 1 |
| 9 | 31 | 3 | 1 |
| 10 | 31 | 3 | 1 |
| 11 | 42 | 4 | 1 |
| 12 | 43 | 4 | 1 |
| 13 | 42 | 4 | 1 |
| 14 | 28 | 5 | 1 |
| 15 | 30 | 5 | 1 |
| 16 | 29 | 5 | 1 |
| 17 | 42 | 6 | 1 |
| 18 | 42 | 6 | 1 |
| 19 | 43 | 6 | 1 |

Planilha1

Fonte: Os autores (2023).

Na Figura 5, podemos observar o recorte das medições do operador 1 para as seis primeiras peças, onde foram realizadas três medições em cada peça.

## 4.2. FUNÇÃO PARA ANÁLISE DE R&R

Para fazer a análise de R&R usa-se a função ss.rr(), seus argumentos estão na Tabela 2. A função ss.rr() faz o estudo R&R para a variável medida, levando em consideração os fatores peça e avaliador/operador. Apresenta informações das fontes de variabilidade e um relatório de análise de R&R que inclui: gráfico de barras com as fontes de variabilidade, gráficos por avaliador, peças e interação e gráficos de controle $\bar{x}$ e R.

Importante destacar que é necessário especificar no argumento method o método de análise a realizar, “crossed” ou “nested”. Quando todas as peças são medidas por todos os operadores, como no caso do exemplo explorado a seguir, deve-se usar method = “crossed”. Nos casos em que cada peça é medida somente por um único operador, deve-se utilizar method = “nested”. É necessário certificar-se de selecionar o método correto de acordo com os procedimentos de medição executados, caso contrário, os resultados apresentados não farão sentido.

**Tabela 2 –** Argumentos da função ss.rr()

| Argumento | Descrição |
|---|---|
| *var* | Variável medida. |
| *part* | Fator peças. |
| *appr* | Fator para operadores, máquinas, ... |
| *lsl* | Abreviação de *low specification limit*, ou seja, limite inferior de especificação (LIE) usado com o limite superior de especificação (LSE) para calcular a variação do estudo como % de tolerância. |
| *usl* | Abreviação de *upper specification limit*, ou seja, LSE usado com o LIE para calcular a variação do estudo como % de tolerância. |
| *sigma* | Número de desvios padrão usado no cálculo da variabilidade/dispersão. |
| *tolerance* | Valor da tolerância. Corresponde ao LSE menos o LIE, ou pode ser especificada manualmente. |
| *data* | *Dataframe* com as variáveis medidas. |
| *main* | Título principal dos gráficos gerados no relatório. |
| *sub* | Subtítulo dos relatórios com os gráficos gerados (recomendado para utilizar como nome do projeto). |
| *alphaLim* | Se o valor de *p* de uma interação for ≥ alphaLim, a tabela ANOVA com interação do modelo completo é omitida, porque não é significativa. |
| *errorTerm* | Termo do modelo usado como termo de erro (para modelo com interação), podendo ser "interaction", ou "repeatability". |
| *digits* | Casas decimais a serem utilizadas. |
| *method* | Tipo de método de análise a ser realizada, "crossed" (*default*) ou "nested". |
| *print_plot* | Se TRUE (*default*) os gráficos do relatório são gerados. |
| *signifstars* | Se FALSE (*default*) os asteriscos que representam a significância são omitidos. |

Fonte: Os autores (2023).

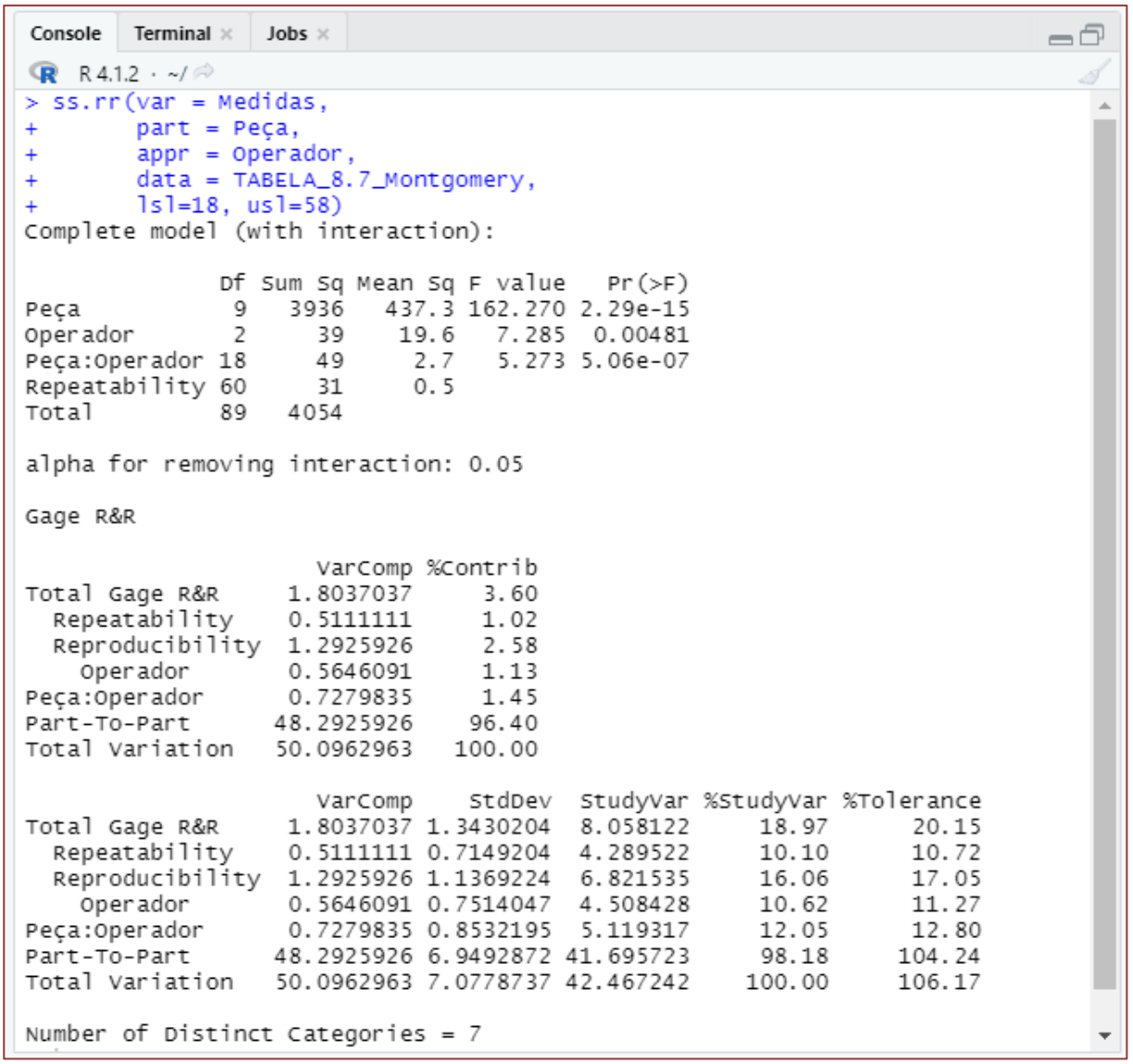
A Figura 6 apresenta o resultado da aplicação do comando ss.rr(var = Medidas, part = Peça, appr = Operador, data = Tabela_8.7_Montgomery,lsl=18, usl=58) para os dados em análise.

Onde var = Medidas é a primeira coluna da planilha eletrônica que contém as medidas das peças; part = Peça é a segunda coluna da planilha eletrônica que contém o número da peça medida, ou seja, identifica a peça medida; appr = Operador é a terceira coluna da planilha eletrônica que contém o número do operador que mediu a peça, ou seja, identifica o operador que fez a medição; data = Tabela_8.7_Montgomery é o nome do conjunto de dados, ou seja, o nome da planilha eletrônica que foi importada com os dados para análise de R&R. Os argumentos lsl e usl, são os valores de LIE = 18°C/W × 100 e LSE = 58°C/W × 100, respectivamente.

A primeira informação apresentada na Figura 6, é a tabela ANOVA com o modelo completo para dois fatores com interação. Com nível de significância de 5%, a análise do valor-p < 0,001 do fator peça indica a rejeição de $H_0$ de que as peças têm medidas iguais, ou seja, há diferença entre as peças. Isso é bom porque é necessário ter amostras de peças de tamanhos diferentes para avaliar o sistema de medição. A interpretação ocorre da mesma forma para o fator operador e para a interação.

O valor da coluna Mean Sq, é a soma de quadrados, na penúltima linha da tabela ANOVA, indica a variância da repetibilidade ($\sigma^2_{repetibilidade} = 0{,}5$).

**Figura 6 –** ANOVA da impedância térmica versus número da peça, operador e análise de R&R




```
> ss.rr(var = Medidas,
+       part = Peça,
+       appr = Operador,
+       data = TABELA_8.7_Montgomery,
+       lsl=18, usl=58)
Complete model (with interaction):

              Df Sum Sq Mean Sq F value   Pr(>F)
Peça           9   3936   437.3 162.270 2.29e-15
Operador       2     39    19.6   7.285  0.00481
Peça:Operador 18     49     2.7   5.273 5.06e-07
Repeatability 60     31     0.5
Total         89   4054

alpha for removing interaction: 0.05

Gage R&R

                     VarComp %Contrib
Total Gage R&R     1.8037037     3.60
  Repeatability    0.5111111     1.02
  Reproducibility  1.2925926     2.58
    Operador       0.5646091     1.13
Peça:Operador      0.7279835     1.45
Part-To-Part      48.2925926    96.40
Total Variation   50.0962963   100.00

                     VarComp    StdDev  StudyVar %StudyVar %Tolerance
Total Gage R&R     1.8037037 1.3430204  8.058122     18.97      20.15
  Repeatability    0.5111111 0.7149204  4.289522     10.10      10.72
  Reproducibility  1.2925926 1.1369224  6.821535     16.06      17.05
    Operador       0.5646091 0.7514047  4.508428     10.62      11.27
Peça:Operador      0.7279835 0.8532195  5.119317     12.05      12.80
Part-To-Part      48.2925926 6.9492872 41.695723     98.18     104.24
Total Variation   50.0962963 7.0778737 42.467242    100.00     106.17

Number of Distinct Categories = 7
```

Fonte: Os autores (2024).

Logo após a tabela ANOVA, há a informação alpha for removing interaction: 0.05, que indica o nível de significância ($\alpha$) limite para o qual, a interação do modelo completo é omitida, porque a interação não é significativa. No exemplo, a interação peça:operador, tem valor-p < 0,001. E como o nível de significância (0,05) é superior à probabilidade de significância (p-valor < 0,001), a interação é significativa, o modelo completo com interação é apresentado.

Na sequência, na segunda parte dos resultados da Figura 6 em Gage RR, são apresentadas as componentes das variâncias. Na primeira coluna, consta a denominação de cada componente da variância, em que Total Gage RR é a variância da medição; Repeatability é a repetibilidade; Reproducibility é a reprodutibilidade; Operador é o fator operador; Peça:Operador é a interação entre peça e operador; Part-To-Part representa as peças e Total Variation é a variação total. A segunda coluna VarComp, refere-se a variância de cada

componente da coluna anterior, e a terceira coluna %Contrib, é a contribuição percentual de cada uma das componentes das variâncias. Por exemplo, o valor de 1,02% devido à repetibilidade contribui muito pouco para a variabilidade do sistema de medição e mostra que quando os operadores medem a mesma peça, eles repetem as leituras, o que é desejado. O percentual de variação devido à reprodutibilidade (2,58%) sugere que quando operadores diferentes medem a mesma peça, eles obtêm resultados parecidos, o que é esperado.

A variância total do sistema de medição (Total Gage R&R), ou seja, $\sigma^2_{medição} = 1{,}8037037$ corresponde a 3,60% da variação total.

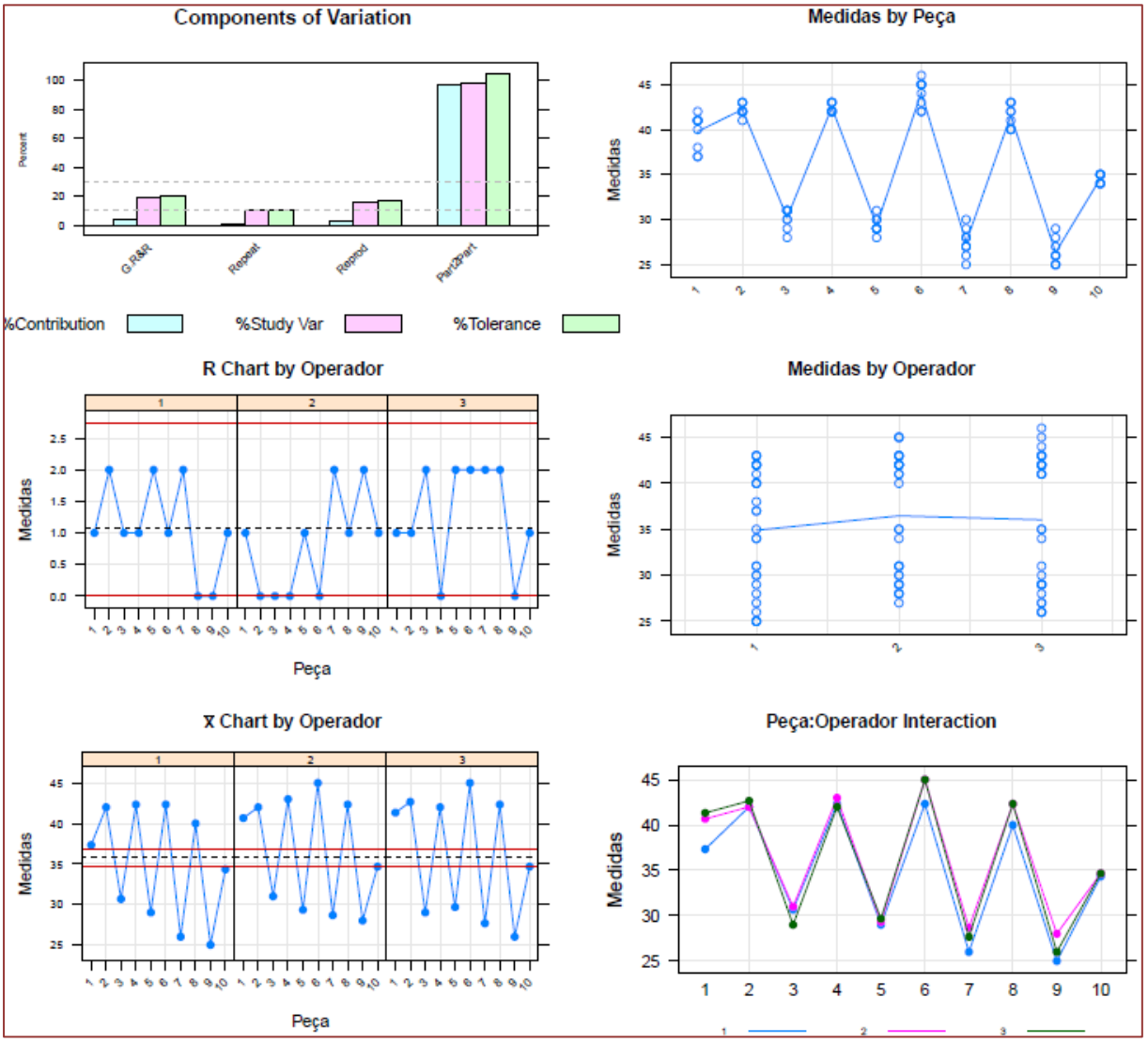
Logo abaixo, o último bloco de informações da Figura 6, repete a primeira e segunda coluna do bloco anterior, e inclui novas colunas: StdDev, StudyVar, %StudyVar e %Tolerance. Onde, StdDev é o desvio padrão de cada componente. Na coluna StdDev Repeatability é a repetibilidade do sistema de medição ($\sigma_{\text{repetibilidade}} = 0{,}7149204$) e StdDev Reproducibility é a reprodutibilidade do sistema de medição ($\sigma_{\text{reprodutibilidade}} = 1{,}1369224$). StudyVar são os valores de 6σ, ou seja, o intervalo dado por seis desvios padrões, que devem conter 99% das medidas feitas (VIEIRA, 2014). E %StudyVar é a proporção de cada causa de variação (StudyVar) em relação à variação total, em termos de desvios padrões. Na linha Total Gage R&R, o valor de %StudyVar = 18,97 indica que o sistema de medição pode ser adequado dependendo da importância da aplicação. Por sua vez, %Tolerance é a faixa de tolerância, ou seja, a precisão para a tolerância $\frac{P}{T}$ dada pela Equação 7. Com LIE = 18°C/W × 100 e LSE = 58°C/W × 100, temos $\frac{P}{T} = 20{,}15$.

A última linha da Figura 6, mostra a informação Number of Distinct Categories = 7 que corresponde ao número de categorias distintas; ou seja, é uma métrica para identificar a capacidade de um sistema de medição para detectar uma diferença na característica medida. O número de categorias distintas representa o número de intervalos de confiança não sobrepostos que abrangem a gama de variação do produto. O número de categorias distintas também representa o número de grupos dentro dos dados que o sistema de medição é capaz de discernir (Salazar, 2019; Minitab, 2024b).

De acordo com a recomendação do manual da AIAG (2010) o número de categorias distintas $\geq 5$ indica um sistema de medição aceitável.

Além da saída apresentada previamente analisada pelo pacote *SixSigma*, ele também apresenta um relatório (Figura 7), com gráficos que complementam as análises quantitativas.

**Figura 7 –** Gráficos relatório do pacote *SixSigma*




Fonte: Os autores (2024).

O primeiro gráfico à esquerda da Figura 7, tem como finalidade detectar se os problemas de medição são provenientes da repetibilidade ou da reprodutibilidade. Apresenta uma comparação visual das fontes de variação, ou seja, é o gráfico das percentagens da contribuição, da variação do estudo e da tolerância. Neste exemplo, quase toda a variação do estudo é devida ao componente peça (part-to-part), sendo que a repetitividade e a reprodutibilidade têm influência mínima. Esta é a situação desejada, no qual o sistema de medição é considerado adequado. As barras azuis representam o percentual de contribuição de cada fonte de variação, as barras rosas, o percentual de variação do estudo, em relação a cada fonte de variação e as barras verdes, o percentual de tolerância em relação a cada fonte de variação.

O gráfico de controle R, segundo o gráfico à esquerda da Figura 7, avalia a consistência do sistema de medição. A situação desejável é sob controle estatístico. Como nele há pontos dentro dos limites de controle, tem-se a garantia de que as medidas obtidas pelo sistema de medição estão de acordo.

O gráfico de controle $\bar{x}$, terceiro gráfico à esquerda da Figura 7, avalia a habilidade do sistema de medição em fazer a distinção entre diferentes produtos (neste exemplo, peças). Espera-se muitos pontos fora dos limites de controle. Este gráfico mostra pontos fora dos limites de controle (estão além das linhas horizontais vermelhas – limites de controle), indicando que as peças medidas tinham tamanhos diferentes. Assim, tem-se que o instrumento foi testado em toda a amplitude de medidas.

Os resultados das medições por peças, estão no primeiro gráfico à direita da Figura 7, que mostra a variabilidade entre as peças. Observa-se que as peças 3, 5, 7 e 9 possuem medidas menor; as peças 1, 2, 4, 6 e 8 possuem medidas maiores; e a peça 10 possui medida intermediária, quando comparada com as outras peças.

O segundo gráfico à direita da Figura 7, mostra a variabilidade entre os operadores (reprodutibilidade). Nele estão os resultados das medições por operador, com valores individuais e médias das medições para cada operador. Verifica-se certa variabilidade na medição que ocorre pelos três operadores.

Finalmente, o terceiro gráfico à direita da Figura 7, mostra o gráfico de interação entre os dois fatores peças e operadores. Neste gráfico são plotados os pares de informações: médias das medições feitas em cada peça por cada operador e o número de identificação das peças. Os pontos são ligados para formar linhas, sendo a quantidade de linhas igual ao número de operadores da análise de R&R. Se as linhas forem aproximadamente paralelas, não existe interação. Quanto mais as linhas se cruzarem, mais forte será a interação. Para o exemplo, as linhas não estão sempre paralelas, o que indica haver interação significativa. Neste gráfico se observa que para a peça número 10 há resultados parecidos em média, nas medições entre os operadores. Porém, nas outras peças essa situação não é observada. Por exemplo, na peça número 1, é nítida a diferença de medida entre os três operadores, que estão representados pelas linhas de diferentes cores.

## 5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa explorou uma função específica do pacote *SixSigma* do R/RStudio por meio de uma aplicação de análise de R&R a fim de proporcionar entendimento quanto a seu uso. Por meio das análises realizadas, constatou-se que a função do pacote para análise de R&R é bem completa, podendo ser explorado diferentes cenários de análise, quando da alteração dos parâmetros da função.

Outra consideração importante é que o pacote *SixSigma* do R/RStudio apresenta as mesmas saídas com informações e relatórios, presentes em *softwares* comerciais de CEQ que fazem análise de R&R como, por exemplo, o Minitab.

O estudo mostrou que é possível usar a análise de R&R do pacote *SixSigma* do R/RStudio como ferramenta auxiliar no ensino de CEQ, podendo ampliar o embasamento teórico dos estudantes no tema, bem como introduzir seu uso por aqueles cujos recursos para aquisição de *softwares* comerciais são escassos.

Acredita-se que esta pesquisa, por ter explorado um assunto importante e recorrente tanto na área acadêmica, quanto no âmbito industrial da área de CEQ será útil e poderá colaborar no incentivo do uso de *softwares* livres por estudantes e profissionais da área.

Como continuidade desta pesquisa, sugere-se avaliar outras funções do pacote *SixSigma* e comparar com outros pacotes do *software* R de CEQ, como por exemplo o pacote *qcc* (Scrucca, 2004), *IQCC* (Barros *et al.*, 2014) e *spc* (Knoth, 2023) e fazer um painel

comparativo destacando as principais características, pontos fracos e pontos fortes de cada um deles.

Além disso, sugere-se investigar a percepção de alunos do curso de graduação de Engenharia de Produção acerca do uso do pacote *SixSigma* do R/RStudio em disciplinas que abordam o tema CEQ, uma vez que são escassas no Brasil pesquisas que avaliam o efeito de *softwares* de CEQ no processo de ensino e aprendizagem.

## AGRADECIMENTOS

A pesquisa contou com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Termo de outorga 311829/2022-8).

## REFERÊNCIAS

[1] ALHASSAN, M. A.; JAWAWI, D. N. A. Sequential strategy for software process measurement that uses Statistical Process Control. *In:* **MALAYSIAN SOFTWARE ENGINEERING CONFERENCE** (MySEC), 8., 2014, Langkawi Malaysia. Anais [...], 23-24 September 2014, p. 37-42. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6985986. Acesso em: 21 out. 2024.

[2] AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP - AIAG (2010**)**. **Manual de Referência de Análise de Sistemas de Medição**, 4ª ed. Força Tarefa de Requisitos da Qualidade de Fornecedores da Chrysler, Ford e General Motors.

[3] BARROS, F.; BARBOSA, E.; P.; GONÇALVES, E.; RECCHIA, D. IQCC: improved quality control charts. (2014). Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/IQCC/index.html. Acesso em: 21 out. 2024.

[4] CANO, E. L.; MOGUERZA, J. M.; REDCHUK, A. **Six Sigma with R. Statistical Engineering for Process Improvement**. Springer, 2012. Disponível em: https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-3652-2. Acesso em: 21 out. 2024.

[5] CARDOSO, M. G.; STURION, L.; STURION, L. H. C. O ensino de estatística por meio das potencialidades do software RStudio. *In*: NAVARRO, E. R.; SOUSA, M. C. **Educação matemática em pesquisa: perspectivas e tendências**, v. 2, p. 59-73, 2021. Disponível em: https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/201202556.pdf. Acesso em: 21 out. 2024.

[6] COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. 2ª. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

[7] DEWI, D. W. C.; KHAQ, A.; AFIF, M.; JUMINTONO; MARYANI; KHALIKOV, A. Investigating Educational Methods in Learning Using Cultural and Artificial Intelligence. **Evolutionary Studies in Imaginative Culture**, p. 361-369, 2024. https://doi.org/10.70082/esic/8.1.28

[8] FURTADO, J. C. C. **Uma abordagem para o ensino do controle estatístico de processos em cursos superiores de computação**. 2020. 177 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

[9] HOUF, R. F. BERMAN, D. B. Statistical Analysis of Power Module Thermal Test Equipment Performance, **IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology**, v. 11, n. 4, p. 516-520, 10-12 February, 1988.

[10] JUCÁ, S. C. S. A relevância dos Softwares educativos na educação profissional. **Ciências & Cognição**, v. 8, p. 22-28, 2006. Disponível em: http://pepsic.bvsalud.org/pdf/cc/v8/v8a04.pdf. Acesso em: 21 out. 2024.

[11] KNOTH, S. **Package 'spc'**. Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/spc/spc.pdf. Acesso em: 21 out. 2024.

[12] MINITAB. **Sobre nós**. Disponível em: https://www.minitab.com/pt-br/company/. Acesso em: 21 out. 2024a.

[13] MINITAB. **Suporte ao Minitab 20. Uso do número de categorias distintas**. Disponível em: https://support.minitab.com/pt-br/minitab/20/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/supporting-topics/gage-r-r-analyses/using-the-number-of-distinct-categories/. Acesso em: 21 out. 2024b.

[14] MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico de Qualidade**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

[15] SALAZAR, R. **Six Sigma Gage R&R Analysis with R. Exploring the "SixSigma" R package**. Disponível em: https://towardsdatascience.com/six-sigma-gage-r-r-analysis-with-r-8a1eff6ed94b. Acesso em: 21 out. 2024.

[16] R CORE TEAM (2024). _R: A Language and Environment for Statistical Computing_. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

[17] SCRUCCA, L. QCC: an R package for quality control charting and statistical process control. **R News**, v. 4, n. 1, p. 11-17, 2004.

[18] SILVA, H. A.; MOURA, A. S. Teaching introductory statistical classes in medical schools using RStudio and R statistical language: evaluating technology acceptance and change in attitude toward statistics. **Journal of Statistics Education**, v. 28, n. 2, p. 212-219, 2020. DOI: 10.1080/10691898.2020.1773354

[19] SILVA, K. C. N.; FRASSETO, L. S.; ZAGO, B. P. BILESSIMO, S. M. S.; SILVA, J. B. Plataforma de aprendizagem "Kahoot!" como complemento para o ensino aprendizagem de operações logísticas em organizações. *In*: SILVA, J. B.; BILESSIMO, S. M. S.; ALVES, J. B. M. **Integração de Tecnologias na Educação: Práticas inovadoras na Educação Básica**. (Orgs.). Volume 3. Araranguá: Hard Tech Informática Ltda., 2019, p. 281-294. Disponível em: https://rexlab.ufsc.br/wp-content/uploads/2019/08/ebook_vol_3_final_.pdf. Acesso em: 21 out. 2024.

[20] STANDER, J.; VALLE, L. D. On enthusing students about big data and social media visualization and analysis using R, RStudio, and RMarkdown. **Journal of Statistics Education**, v. 25, n. 2, p. 60-67, 2017. DOI: 10.1080/10691898.2017.1322474

[21] TOLEDO, J. C.; LIZARELLI, F. L.; SANTANA JUNIOR, M. B. Success factors in the implementation of statistical process control: action research in a chemical plant. **Production**, v. 27, 2017.

[22] VENDRAMINI, C. M. M.; SILVA, C. B.; KATAOKA, V. Y.; CAZORLA, I. M. Validity Evidences of the Attitudes Towards Statistics Scale SATSPORTUGUÊS: A Study with Brazilian Students. *In:* WORLD STATISTICS CONGRESS OF THE INTERNATIONAL STATISTICAL INSTITUTE, 58., 2011, Dublin. Anais [...], p. 5997-6000. Disponível em: https://2011.isiproceedings.org/papers/950155.pdf. Acesso em: 21 out. 2024.

[23] VIEIRA, S. **Estatística para a Qualidade**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

# Capítulo 7

## *Biorrefinarias em estações de tratamento de esgoto para o desenvolvimento sustentado no setor de saneamento*

*Mauro Donizeti Berni*
*Paulo Cesar Manduca*

Resumo: O lodo biológico produzido em estações de tratamento de esgoto (ETE) pode representar mais de 50% dos custos operacionais de uma ETE. Associado a isto, a destinação inadequada desse resíduo em lixões e aterros sanitários controlados são vistos como um problema ambiental que acarreta em prejuízos para o meio ambiente e saúde pública. Nesse sentido, a busca por novas tecnologias de valorização deste resíduo deve ser priorizada. Em contraste a isto no Brasil, países europeus exigem que os lodos sejam utilizados para produção de energia ou submetidos a processos para a obtenção de bioprodutos de maior valor agregado. Neste contexto, na Europa as ETEs, são vistas como potenciais biorrefinarias incorporando os conceitos da economia circular no saneamento, modeladas para recuperação de bioprodutos de alto valor agregado. O objetivo deste trabalho foi o de propor uma metodologia "enxuta", internalizando os conceitos de biorrefinaria e de economia circular, visando determinar o potencial técnico da recuperação de bioprodutos de alto valor agregado (biogás, fertilizantes e água de reuso) para uma ETE de município de médio porte no Estado de São Paulo.

Palavras-chave: biorrefinaria, economia circular, saneamento, bioprodutos, potencial técnico.

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o manuseio e descarte do lodo proveniente das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) é considerado um problema ambiental, pois conforme Nascimento (2022) apub Nizami et al. (2017), na maioria dos países em desenvolvimento, o lodo biológico residual é descartado em lixões ou aterros sanitários controlados, sem qualquer controle ou regulamentação. Em contraste a isso, países europeus exigem que estes compostos sejam utilizados para produção de energia ou submetidos a processos para a obtenção de bioprodutos de maior valor agregado. A partir de iniciativas como essas, conforme discorre Giacomo e Romano (2022), as ETEs podem ser vistas como potenciais biorrefinarias incorporando os conceitos da economia circular no saneamento, modeladas para recuperação de bioprodutos de alto valor agregado.

Não obstante, a aprovação do Novo Marco Legal do Saneamento (NMLS) pelo Governo Federal em 2020, cuja meta é alcançar a universalização até 2033, garantindo que 99% da população tenha acesso à água potável e 90% ao tratamento e a coleta de esgoto, bem como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010, que tem como tem como objetivo principal o gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil, serem importantes instrumentos regulatórios na busca da universalização do serviço de saneamento no Brasil, a expansão dos serviços de saneamento, deve ser acompanhada por um aumento do nível de eficiência operacional na prestação do serviço com custos decrescentes.

Neste contexto, as biorrefinarias em saneamento incorporando os conceitos da economia circular, será imprescindível para a competitividade do setor de saneamento e garantir perenidade em uma nova cadeia de valor

## 2. OBJETIVO

O lodo de esgoto de ETEs é uma biomassa residual a ser utilizada para produzir novos recursos renováveis, que podem entrar na própria cadeia produtiva ou como matéria-prima em outros setores econômicos. O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia "enxuta", internalizando os conceitos de biorrefinaria e de economia circular, visando determinar o potencial técnico da recuperação de bioprodutos de alto valor agregado (biogás, fertilizantes e água de reuso) de uma ETE de município de médio porte no Estado de São Paulo.

## 3. METODOLOGIA

O estudo e avaliação dos potenciais técnicos da biorrefinaria, anexa, a ETE, tem como base, banco de dados de uma ETE localizada em município de médio porte do Estado de São Paulo, para a qual foi realizado estudo de viabilidade técnico econômico, visando a instalação de um sistema híbrido de geração de energia, utilizando o software Homer. Os resultados do referido estudo, estão publicados em Journal of Environmental Management, Volume 305, 1 March 2022, 114389, em artigo intitulado "*Design and techno-economic analysis of a hybrid system for energy supply in a wastewater treatment plant: A decentralized energy strategy*".

Além disso, a metodologia adotada contempla a pesquisa aos arquivos públicos e análise dos documentos e revisão bibliográfica sobre o tema saneamento básico, meio ambiente, tecnologias de geração de energia e o aproveitamento energético de lodos e o

processamento de bioprodutos em biorrefinarias. Segue-se o desenho da biorrefinaria e cálculo dos potenciais técnicos de recuperação de bioprodutos e bioenergia, a saber:

i. PTE: potencial técnico para geração de biogás e eletricidade;

ii. PTF: potencial técnico de produção de digerido (fertilizante); e

iii. PTA: potencial técnico para produção de água bruta para reúso.

O conhecimento dos potenciais técnicos é um dos pilares fundamentais para que sejam identificadas e direcionadas as ações apropriadas para que os mesmos possam ser efetivamente aproveitados. Este conhecimento, em conjunto com um portfólio adequado de políticas e o monitoramento de processos produtivos, compõe a abordagem sistêmica necessária para a valorização do resíduo "lodo". O potencial teórico não considera aspectos tecnológicos, enquanto o potencial técnico leva em conta as restrições tecnológicas e os marcos regulatórios a serem considerados.

A quantidade de lodo gerado por ano na ETEbase é calculado pela equação (1).

$$Qlodo\ (ton) = \frac{\left[produção\ lodo\ \left(\frac{kg}{hab.dia}\right) * população\ (hab) * 360\ (dia)\right]}{1000} \quad (1)$$

O potencial técnico de energia de lodo da ETEbase (PTE) é calculado para as alternativas i) incineração direta – equação (2) e ii) produção de biogás equações (3) e (4).

$$PTEinicineração\ (MJ) = Qlodo(ton) * PCIlodo\left(\frac{MJ}{ton}\right) \quad (2)$$

$$Qbiogas\ (m^3) = Qlodo\ (ton) * 9.86\frac{m^3}{ton} \quad (3)$$

$$PTEbiogas\ (MJ) = Qbiogas\ (m^3) * PCIbiogas\left(\frac{MJ}{N\ m^3}\right) \quad (4)$$

Nos cálculos do PTF e PTA, utilizam-se informações tabuladas em estudo de tratamento de esgotos de Von SperlinG (2001), quando ao afluente de um sistema de tratamento anaeróbio com reator UASB, a saber: i) lodo resultante de centrifugação apresenta um teor de sólidos médio de 25%; e ii) extração de água para reuso de 75% equações (5) e (6).

$$PTF\ (ton) = Qlodo\ (ton) * 0,25 \quad (5)$$

$$PTA\ (ton) = Qlodo\ (ton) * 0,75 \quad (6)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste estudo de caso demonstram que os potenciais técnicos PTE, PTF e PTA, devem ser considerados como referências preliminares para a tomada de decisão na elaboração de projetos "leam" para o uso de lodo de ETEs. Os excedentes, em relação ao consumo próprio, da eletricidade gerada podem ser vendidos à rede pública e bioprodutos absorvidos pela economia regional. Os potenciais técnicos PTE, PTF e PTA são métricas que serão ferramentas de dimensionamento de ETE nesta nova conjuntura brasileira. Estes potenciais servirão com benchmarking para as atuais e futuras ETE.

A quantidade e qualidade do lodo produzido por uma ETE depende da vazão de esgoto tratado, das características do esgoto, do tipo de tratamento e da operação da ETE. O tratamento de esgotos gera lodos cujo aproveitamento permitem a recuperação de materiais gasosos, líquidos e sólidos.

Os resultados e discussões apresentados a seguir, mostram os potenciais técnicos PTE, PTF e PTA, que devem ser considerados como benchmarkings preliminares para a tomada de decisão na elaboração de projetos "leam" de aproveitamento de lodos em ETEs, através de sistemas híbridos.

Para o estudo de caso, tem-se como premissa informações do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) do município onde está localizada a ETEbase. De acordo com o PMSB, estima-se que 80% do volume de água consumido pela população é posteriormente coletado sob forma de esgoto doméstico. Para um consumo per capita de água de 188 l/hab.d, têm se a geração diária de esgotos per capta 150 l/hab.d.

A produção de anual de lodo da ETEbase com a tecnologia de lodo ativado com aeração prolongada (LAAP) (Qlodo), considera-se o valor médio obtido em balanço de massa teórico de uma produção de lodo de 0,29 kg/hab.dia, base seca, (Von Sperling, 2001) com o atendimento de 65% da população que possui coleta e tratamento (58.500 habitantes), através da equação (1).

A produção de lodo efluente da ETEbase no ano de 2018 foi de 6.192 toneladas.

O aproveitamento energético do biogás derivado de ETEs é uma prática adotada por vários países. O biogás pode ser destinado à queima direta para gerar energia térmica (incineração) ou pode ser convertido em energia elétrica em motores de combustão externa, turbinas a gás e microturbinas. Essa utilização do biogás, além de evitar a emissão do gás metano à atmosfera, representa uma nova alternativa na matriz energética do país. A redução dos gases de exaustão também acaba com o forte odor oriundo da digestão anaeróbia do lodo (CETESB, 2016).

O do PTE da alternativa incineração do lodo é calculado conforme a equação (2), considerando o PCI do lodo de 2 MJ/kg, desidratado em filtro prensa com umidade final de 58,7% (Rosa et al., 2016; Lobato, 2011).

O PTE com incineração do lodo da ETEbase é de 12,4 MJ.

Para o cálculo do PTE do biogás, considera-se potencial energético observado por Queiroz et al. (2018) em estudo de biodigestores UASB na CEDAE, Estação de Tratamento de Esgoto da Penha, RJ, da ordem de 9,86 $m^3$ de biogás por tonelada de substrato. Através das equações (3) e (4), calcula-se respectivamente, a produção de biogás (m3) e o PTEbiogas (MJ).

O PTE com biogás do lodo da ETEbase é de 1.312.640 MJ.

Das alternativas de aproveitamento do lodo da ETEbase, verifica-se que o PTE do biogás indica uma opção mais promissora e, portanto, ser a escolhida para aprofundamento de estudos do potencial econômico. Com o aproveitamento energético do biogás obtido a partir do lodo da ETEbase, os benefícios esperados para a ETEbase relacionam-se com a redução de despesas com energia elétrica; redução da produção de lodo global; acréscimo na eficiência do tratamento de esgoto; redução de emissões de GEE e o aumento da sustentabilidade energética global.

Nos cálculos do PTF e PTA, utiliza-se informações tabuladas em estudo de tratamento de esgotos de Von Sperling (2001), quando ao afluente de um sistema de tratamento anaeróbio com reator UASB, a saber: i) lodo resultante de centrifugação apresenta um teor de sólidos médio de 25%; e ii) extração de água para reuso de 75%. O eventual decaimento do total de lodo da ETEbase de 6.192 toneladas por ano foi desprezado para calcular o PTF e PTA (Equações 5 e 6).

O PTF biossolido na forma de fertilizante é de 1.532 toneladas por ano.

O biossolido resultante após digestão anaeróbia pode ter dois caminhos. O primeiro, ineficiente, será enviar para aterro sanitário controlado. O segundo é o seu aproveitamento enquanto fertilizante. Para tanto, faz-se necessário um tratamento, visando corrigir características negativas patogênicas, ainda existente e produzir um material sólido, estável, que não seja nocivo à saúde e possa ser manuseado facilmente e com baixo custo. Os métodos utilizados para estabilizar os biossólidos gerados podem ser processos físicos, físico químicos e biológicos (Jordão e Pessôa, 2014). Com a finalização da caracterização laboratorial do biossolido fertilizante, serão avaliadas as possibilidades de deslocamento de fertilizante fóssil da agricultura do entorno da ETE. Resultados serão disponibilizados em próximo trabalho.

O PTA do reuso de água PTA obtido através da equação (6) é de aproximadamente 4.644 toneladas por ano.

O reuso de água não é um conceito novo e vem sendo praticado em todo o mundo em função da presença de oxigênio. O maior consumo de água e a menor disponibilidade hídrica têm feito do reuso um tema de grande importância. Tem sido crescente a consciência do uso racional da água, necessidade de redução de perdas, desperdícios e do reuso de efluentes tratados.

Foi aprovado pelo Senado Federal Brasileiro o Projeto de Lei (PL) 4.162/2019 cujos objetivos são centralizar a regulação dos serviços de saneamento básico e instituir a obrigatoriedade de licitações e regionalizar a prestação a partir da montagem de blocos de municípios (Senado Federal, 2020). O PL estende os prazos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305, de 2010) para que as cidades encerrem os lixões a céu aberto. Os novos prazos iriam até 2021 para capitais e regiões metropolitanas e, até 2024 para municípios com até 50 mil habitantes.

No Brasil as principais aplicações de reuso de água tem sido através da irrigação de áreas cultiváveis; aspersão de áreas de parques e campos esportivos; reuso nas atividades do setor de saneamento; uso domiciliar e comercial como água não potável; reuso industrial; recarga artificial de aquíferos; uso público; uso na construção civil e reservação com fins recreacionais.

O resultado do PTA é inicial e no momento, simulações estão sendo executadas para avaliar a superfície vegetal que pode ser irrigada, considerando a variável de contorno evapotranspiração e desconsideração do parâmetro precipitação. Resultados serão disponibilizados em próximo trabalho.

## 5. CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

A utilização do conceito de potenciais técnicos para o projeto e/ou retrofit de ETEs, ainda é uma pratica pouco difundida no Brasil. A superação do enorme déficit que o país tem em coleta e saneamento traz, em sua esteira, um potencial significativo de bioprodutos que podem ser gerados com o substrato do lodo. Nesse caso, existem mecanismos de incentivo que podem garantir que as ETEs atuais e futuras sejam consideradas biorrefinarias.

Os esgotos constituem uma fonte importante para a geração de biogás pelo alto teor de matéria orgânica, água de reuso e fertilizante orgânicos. Esta prática ainda é pouco difundida nas ETEs do Brasil. A superação do enorme déficit que o País tem na coleta e tratamento dos esgotos traz, em seu bojo, um potencial significativo de geração de energia

elétrica com o biogás que pode ser gerado com este substrato, cabendo mecanismos de fomento que possam assegurar que as as atuais e futuras ETEs contemplem a integração de sistemas híbridos sob o conceito de biorrefinaria em ETEs. Estudos continuam a serem executados tendo o presente trabalho, indicativos metodológicos, visando estabelecer *benchmarkings* para *retrofits* ou novos projetos de ETEs, aderentes a economia circular através da recuperação de materiais de lodos gerados, mitigando impactos ambientais com a geração de emprego e renda.

## AGRADECIMENTOS

Ao Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energética (NIPE), UNICAMP pelas instalações e apoio de infraestrutura computacional.

## REFERÊNCIAS

[1] CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo; Biogás: projetos e pesquisas no Brasil, CETESB responsável técnico João Wagner Silva Alves, São Paulo: SMA, 2016, 184 p.

[2] GIACOMO G. D., ROMANO P., Evolution and Prospects in Managing Sewage Sludge Resulting from Municipal Wastewater Purification, Energies 2022, 15, 5633. https://doi.org/10.3390/en15155633, https://www.mdpi.com/journal/energies, 2022.

[3] JORDÃO, E.P e PESSÔA, C.A., Tratamento de Esgotos Domésticos. 7ª ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambinetal, ABES, 2014, 1087 p.

[4] LOBATO, L. C. S., Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico, Orientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, Tese (doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2011, 184 p.

[5] NASCIMENTO, E. C. P., Recuperação de bioprodutos de lodo granular aeróbio e de consórcio granular algal-bacteriano, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2022, 90 pp.

[6] NIZAMI, Abdul-Sattar et al. Waste biorefineries: enabling circular economies in developing countries. Bioresource technology, v. 241, p. 1101-1117, 2017.

[7] QUEIROZ et al., Caracterização da Produção de Biogás a Partir da Biodigestão de Lodo de Esgoto, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, RS, 2018, 10 p.

[8] ROSA, A. P. et al., Energy potential and alternative usages of biogas and sludge from UASB reactors: case study of the Laboreaux wastewater treatment plant (Itabira), Eng Sanit Ambient, v.21, n.2, abr/jun, 315-328, DOI: 10.1590/S1413-4152201612332, 2016.

[9] SENADO FEDERAL, 2020, PL 4.162/2019, Marco Regulatório do Saneamento, Disponível: https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2020/04/06/novo-marco-do-saneamento-basico-pode-ser-votado-no-combate-ao-coronavirus, Acessado: março 2023.

[10] VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuarias, 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2001, 452 p.

# Capítulo 8

## *Utilização das cartas de controle da média e da amplitude para monitorar o comprimento de eixos de comando em três máquinas em um processo produtivo*

*Jean de Lima Soares*
*Guilherme Donatto Amaro*
*João Ercio Miranda Júnior*
*Karen Cristina Ribeiro Sarandy*
*Nilo Antonio de Souza Sampaio*

Resumo: O objetivo deste estudo foi comparar o número de defeitos por máquinas e por turnos para verificar se existe associação entre turnos e máquinas com relação a defeitos. Para atingir esse objetivo, foi realizado um Teste do Qui-Quadrado de Associação para verificar se existe essa associação. Vale ressaltar que a confidencialidade dos dados foi priorizada em prol dos interesses da empresa.

Palavras-chave: Software Estatístico Minitab 19, Gráfico do Qui-Quadrado de Associação, Tabela de Contigência, Processo Produtivo.

## 1. INTRODUÇÂO

A ciência sofreu uma revolução durante o século passado devido à evolução da estatística, que foi capaz de melhorar os processos de pesquisa na evolução da análise de processos e parâmetros. A estatística é amplamente utilizada em diversas áreas de conhecimento, tendo como objetivo prever, otimizar e qualificar processos de produção, pesquisa e em questões jurídicas (Ignácio, 2010; Salsburg, 2009).

No setor industrial, a estatística é aplicada pelos engenheiros com o intuito de otimizar os processos de produção, diminuindo seu tempo e qualificando os produtos produzidos, já que a melhoria da qualidade de produção é o que dita o destaque no mercado competitivo de produção. A partir da utilização de informações que possam diagnosticar falhas, defeitos e formas de otimização dentro da indústria, a estatística é inserida para avaliar as causas em tempo real, gerando uma melhoria de produção e resultados, aumentando o lucro, auxiliando na economia e desperdício de insumos (Ignácio, 2010; Sánchez-Fernández et al., 2018; Yang, 2008).

As Cartas de Controle são as principais técnicas de controle estatístico de processos utilizados na indústria. São técnicas diversamente empregadas, de monitoramento real do processo para detectar não conformidades e causas de variabilidade, com o objetivo prevenir e minimizar impactos negativos para o processo (Montgomery & Runger, 2021; Violante et al., 2024).

O Controle Estatístico de Processo é um conjunto de ferramentas que pretende reduzir a variabilidade a fim de encontrar a estabilidade e melhorar a capacidade de processo, permitindo o crescimento da qualidade e produtividade, o que garante a sua confiabilidade (Milan et al., 2002; Montgomery & Runger, 2021).

O objetivo deste artigo é mostrar uma aplicação específica da Carta de Controle por Variáveis para a Média e a Amplitude. Inicialmente, o artigo abordará os conceitos desse tipo de Carta de Controle. Em seguida, serão apresentados os resultados e as discussões dos objetivos propostos, e será apresentada uma aplicação com dados extraídos de uma empresa. Por fim, serão apresentadas as Conclusões.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. CARTAS DE CONTROLE PARA PROCESSOS INDUSTRIAIS

As cartas de controle para processos industriais são uma ferramenta desenvolvida para aplicação em processos industriais, através de uma representação gráfica das observações coletadas de uma variável do processo em um determinado intervalo de tempo de medição, possuindo uma faixa em que essa variável poderá sofrer alterações. Seu principal objetivo é distinguir e examinar as variações normais e anormais afim de minimizar erros e variabilidade na produção, aumentar sua produtividade e, consequentemente diminuir os custos produtivos. Além disso, o monitoramento dos processos industrias através das cartas de controle garantem uma confiabilidade e manutenção da qualidade do produto devido as observações coletadas que possuem grande parte das informações do processo (Guthrie et al., 2005; Mertens et al., 2011; Sánchez-Fernández et al., 2018).

Um exemplo a ser utilizado as cartas de controle em processos industriais é a aplicação da ferramente.

## 2.2. CARTAS DE CONTROLE POR VARIÁVEIS

As cartas de controle por variáveis são baseadas em medidas das características da qualidade, sendo expressas por um número devido a sua associação com algum tipo de medição, como por exemplo a resistência do material ou seu comprimento. A partir disso, os gráficos de controle vão monitorar o valor médio da característica da qualidade e a sua variabilidade, com o objetivo de identificar o grau da sua aceitabilidade ou não aceitabilidade. Por isso, as cartas de controle por variáveis mostram maiores informações sobre o processo do que os gráficos de controle por atributos (Lima et al., 2006; Montgomery & Runger, 2021; Shafqat et al., 2018).

De acordo com Subramani & Balamurali, 2012a carta de controle por variáveis pode ser aplicada quando o cliente necessita que os produtos a serem produzidos no processo possuam um valor específico para a capacidade do processo. Portanto, o valor da capacidade deverá ser maior que o valor especificado pelo cliente para que o processo seja executado segundo a análise da ferramenta utilizada.

## 2.3. CARTAS DE CONTROLE PARA ATRIBUTOS

Os gráficos de controle para atributos são utilizados quando há um desejo de análise simples e econômico, onde o objetivo é verificar e classificar se o produto possui uma característica particular de interesse, como possuir conformidade ou não, a partir de um padrão. Além disso, sua amostra deverá ser superior aos utilizados nas cartas de controle por variáveis. Existem dois tipos de análise por cartas de controle para atributos. O tipo de gráfico de controle por unidade, também conhecido como Gráfico U, é utilizado quando necessita de uma análise minuciosa, capaz de analisar a quantidade de defeitos por produto fabricado. Já no gráfico de controle para proporção (Gráfico P), a análise é feita utilizando-se a fração defeituosa (Lima et al., 2006; Montgomery & Runger, 2021).

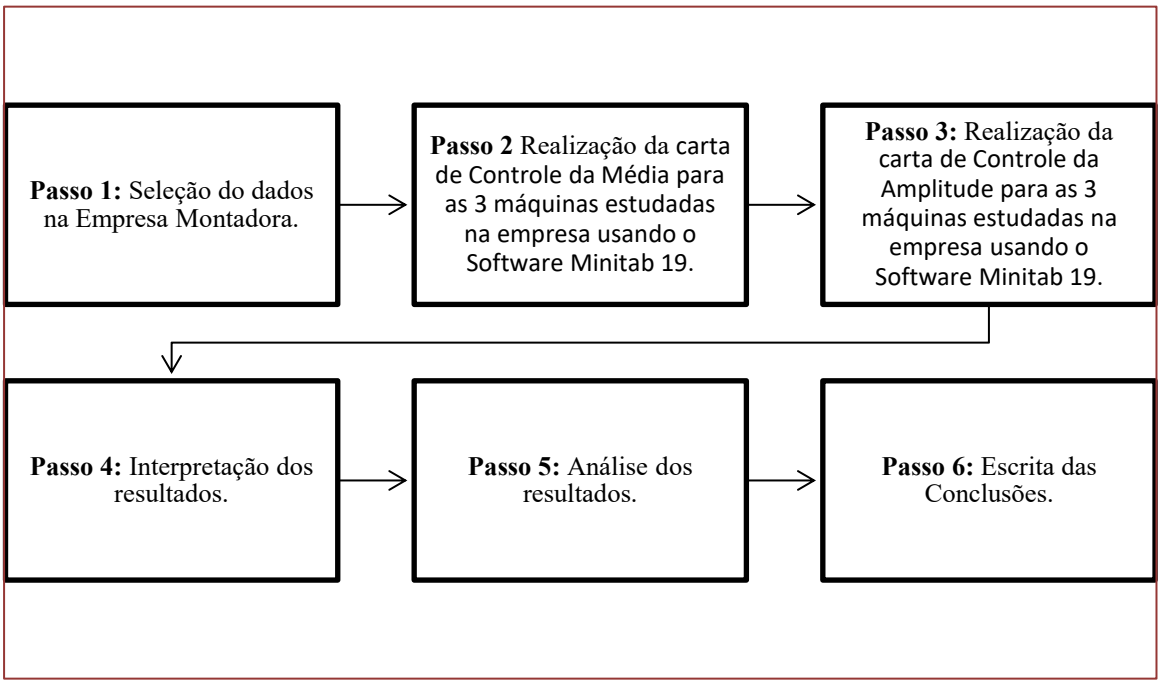
## 3. MÉTODO DE PESQUISA

Este artigo pode ser classificado como uma pesquisa aplicada, pois visa a fornecer melhorias na literatura atual, com objetivos empíricos normativos, visando ao desenvolvimento de políticas e estratégias que melhorarão a condição atual. (Rezende et al., 2023; Sampaio et al., 2022). A abordagem do problema é quantitativa, como o método de pesquisa de modelagem e simulação. As etapas da pesquisa foram realizadas de acordo com a sequência mostrada na Figura1.

- Etapa 1: Os dados experimentais foram selecionados a partir do trabalho de uma Empresa fabricante de peças para uma Montadora de Veículos no sul do Estado do Rio de Janeiro. Essa escolha foi baseada no fato de que era uma oportunidade de aplicar testes estatísticos em uma situação real.
- Etapa 2: Realização da carta de Controle da Média para as 3 máquinas estudadas na empresa usando o Software Minitab 19.
- Etapa 3: Realização da carta de Controle da Amplitude para as 3 máquinas estudadas na empresa usando o Software Minitab 19.
- Etapa 4: foi realizada a interpretação dos resultados.
- Etapa 5: a situação do problema foi analisada e as possíveis tomadas de decisão foram baseadas nos resultados obtidos.

- Etapa 6: As conclusões apresentadas no final deste capítulo de livro foram tiradas com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores.

**Figura 1.** Passos do método de pesquisa




Fonte: Autores (2024).

## 3.1. ESTUDO DE CASO

O problema em questão envolve a fabricação de peças em uma montadora de automóveis na Região Sul Fluminense, que monitora os comprimentos dos eixos de comando. Três máquinas fabricam os eixos de comando durante três turnos por dia. Ocorre a medição de cinco eixos de comando de cada máquina durante cada turno. Na Tabela-1 pode-se visualizar uma Tabela com comprimentos dos eixos em cada uma das três máquinas e dos cinco tipos de eixos. No caso específico dessa empresa a questão que se levanta é se existem peças defeituosas sendo fabricadas. Com o objetivo de se monitorar a fabricação e se responder este questionamento foi realizado uma carta da Média e da Amplitude ( Chamada Carta $\overline{X}$ R ) para monitorar o comprimento dos eixos de comando.

**Tabela 1**. Tabela de comprimento das peças nas 3 Máquinas de cada um dos cinco tipos de Eixos

| Máquina 1 | Máquina 2 | Máquina 3 | ID do subgrupo |
|---|---|---|---|
| 601,4 | 598 | 601,6 | 1 |
| 601,6 | 599,8 | 600,4 | 1 |
| 598 | 600 | 598,4 | 1 |
| 601,4 | 599,8 | 600 | 1 |
| 599,4 | 600 | 596,8 | 1 |
| 600 | 600 | 602,8 | 2 |
| 600,2 | 598,8 | 600,8 | 2 |
| 601,2 | 598,2 | 603,6 | 2 |
| 598,4 | 599,4 | 604,2 | 2 |
| 599 | 599,6 | 602,4 | 2 |
| 601,2 | 599,4 | 598,4 | 3 |
| 601 | 599,4 | 599,6 | 3 |
| 600,8 | 600 | 603,4 | 3 |
| 597,6 | 598,8 | 600,6 | 3 |
| 601,6 | 599,2 | 598,4 | 3 |
| 599,4 | 599,4 | 598,2 | 4 |
| 601,2 | 599,6 | 602 | 4 |
| 598,4 | 599 | 599,4 | 4 |
| 599,2 | 599,2 | 599,4 | 4 |
| 598,8 | 600,6 | 600,8 | 4 |
| 601,4 | 598,8 | 600,8 | 5 |
| 599 | 598,8 | 598,6 | 5 |
| 601 | 599,8 | 600 | 5 |
| 601,6 | 599,2 | 600,4 | 5 |
| 601,4 | 599,4 | 600,8 | 5 |
| 601,4 | 600 | 600,8 | 6 |
| 598,8 | 600,2 | 597,2 | 6 |
| 601,4 | 600,2 | 600,4 | 6 |
| 598,4 | 599,6 | 599,8 | 6 |
| 601,6 | 599 | 596,4 | 6 |
| 598,8 | 599 | 600,4 | 7 |
| 601,2 | 599,8 | 598,2 | 7 |
| 599,6 | 600,8 | 598,6 | 7 |
| 601,2 | 598,8 | 599,6 | 7 |
| 598,2 | 598,2 | 599 | 7 |
| 598,8 | 600 | 598,2 | 8 |
| 597,8 | 599,2 | 599,4 | 8 |
| 598,2 | 599,8 | 599,4 | 8 |
| 598,2 | 601,2 | 600,2 | 8 |
| 598,2 | 600,4 | 599 | 8 |

**Tabela 1**. Tabela de comprimento das peças nas 3 Máquinas de cada um dos cinco tipos de Eixos (continuação)

| Máquina 1 | Máquina 2 | Máquina 3 | ID do subgrupo |
|---|---|---|---|
| 601,2 | 600,2 | 599,4 | 9 |
| 600 | 599,6 | 598 | 9 |
| 598,8 | 599,6 | 597,6 | 9 |
| 599,4 | 599,6 | 598 | 9 |
| 597,2 | 600,2 | 597,6 | 9 |
| 600,8 | 599,2 | 601,2 | 10 |
| 600,6 | 599 | 599 | 10 |
| 599,6 | 599,6 | 600,4 | 10 |
| 599,4 | 600,4 | 600,6 | 10 |
| 598 | 600 | 599 | 10 |
| 600,8 | 599 | 602,2 | 11 |
| 597,8 | 599,6 | 599,8 | 11 |
| 599,2 | 599,4 | 599,8 | 11 |
| 599,2 | 599,2 | 601 | 11 |
| 600,6 | 597,8 | 601,6 | 11 |
| 598 | 600,4 | 601,6 | 12 |
| 598 | 599,6 | 600,2 | 12 |
| 598,8 | 600 | 601,8 | 12 |
| 601 | 600,8 | 601,2 | 12 |
| 600,8 | 600,4 | 597,6 | 12 |
| 598,8 | 599,4 | 599,8 | 13 |
| 599,4 | 599 | 602,8 | 13 |
| 601 | 598,4 | 600 | 13 |
| 598,8 | 599 | 599,6 | 13 |
| 599,6 | 599,6 | 602,2 | 13 |
| 599 | 598,8 | 603,8 | 14 |
| 600,4 | 599,2 | 603,6 | 14 |
| 598,4 | 599,6 | 601,8 | 14 |
| 602,2 | 598,6 | 602 | 14 |
| 601 | 599,8 | 603,6 | 14 |
| 601,4 | 599,6 | 600,8 | 15 |
| 601 | 599,2 | 600,2 | 15 |
| 601,2 | 599,6 | 600,4 | 15 |
| 601,4 | 600,2 | 600,2 | 15 |
| 601,8 | 599,8 | 602,2 | 15 |
| 601,6 | 599,6 | 598 | 16 |
| 601 | 600 | 598,4 | 16 |
| 600,2 | 599,6 | 600,8 | 16 |
| 599 | 599,2 | 602,8 | 16 |
| 601,2 | 598,6 | 597,6 | 16 |

**Tabela 1**. Tabela de comprimento das peças nas 3 Máquinas de cada um dos cinco tipos de Eixos (continuação)

| Máquina 1 | Máquina 2 | Máquina 3 | ID do subgrupo |
|---|---|---|---|
| 601,2 | 599,6 | 601,6 | 17 |
| 601,2 | 601,2 | 603,4 | 17 |
| 601,2 | 599,6 | 597 | 17 |
| 601 | 600,2 | 599,8 | 17 |
| 601 | 600 | 597,8 | 17 |
| 601,4 | 600 | 602,4 | 18 |
| 601,4 | 599,4 | 602,2 | 18 |
| 598,8 | 599,8 | 600,6 | 18 |
| 598,8 | 599,2 | 596,2 | 18 |
| 598,8 | 599,6 | 602,4 | 18 |
| 598,2 | 599,4 | 601,4 | 19 |
| 601,8 | 600 | 599,2 | 19 |
| 601 | 600 | 601,6 | 19 |
| 601,4 | 599,2 | 600,4 | 19 |
| 601,4 | 599,4 | 598 | 19 |
| 599 | 599,6 | 601,2 | 20 |
| 601,4 | 599,8 | 604,2 | 20 |
| 601,8 | 599 | 600,2 | 20 |
| 601,6 | 599,6 | 600 | 20 |
| 601,2 | 599,4 | 596,8 | 20 |

Fonte: Autores (2024).

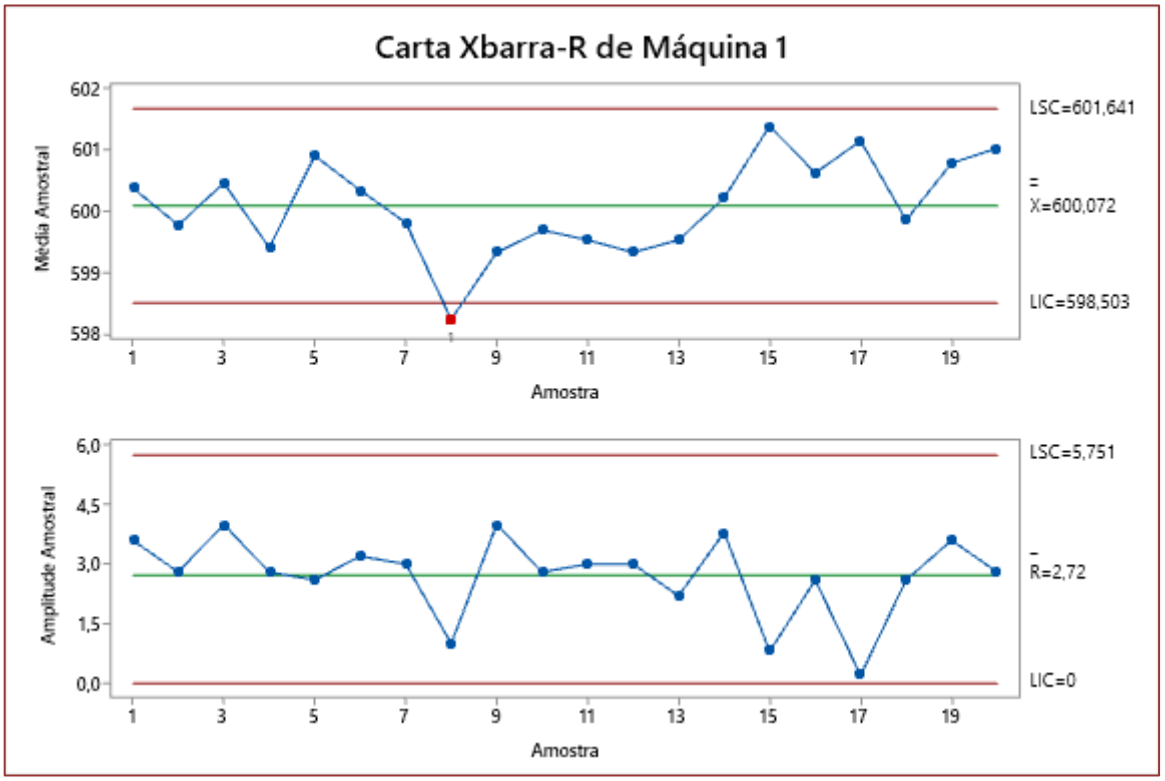
Para o Teste do Qui-Quadrado da Associação as Hipóteses são as evidenciadas abaixo:

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. ESTUDO DE CASO

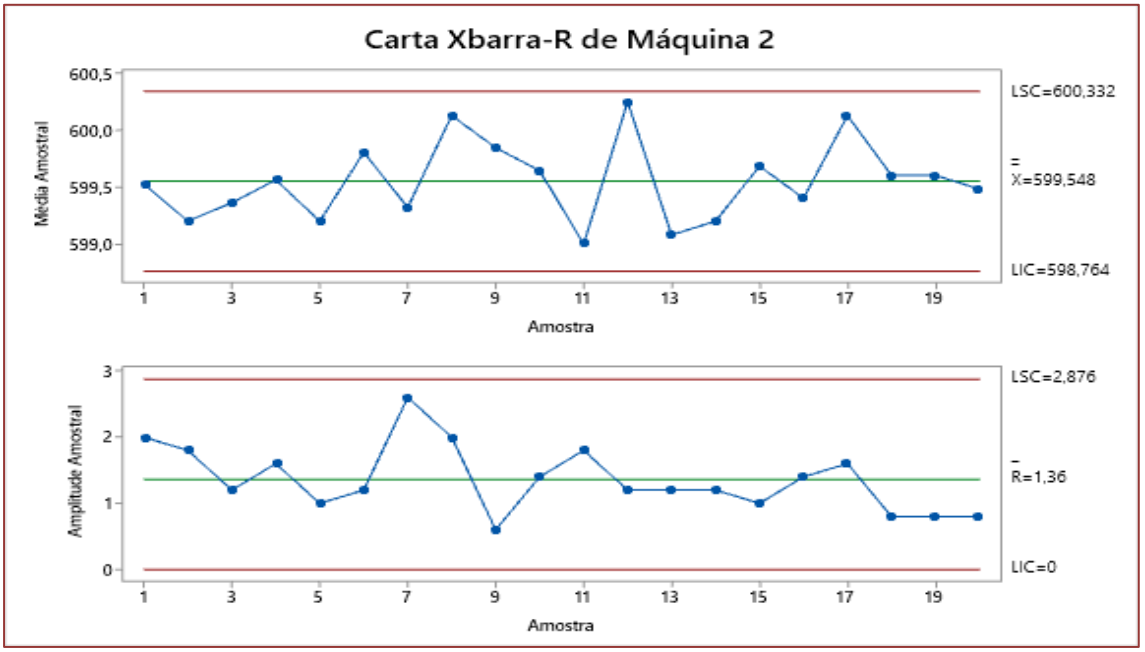
Realizada a construção das Cartas de Controle para a Média e para a Amplitude encontrou-se os resultados obtidos nas Figuras 1,2 e 3 abaixo.

**Figura 1.:** Carta $\overline{X}$ R da Máquina 1 para Monitorar o Processo Produtivo



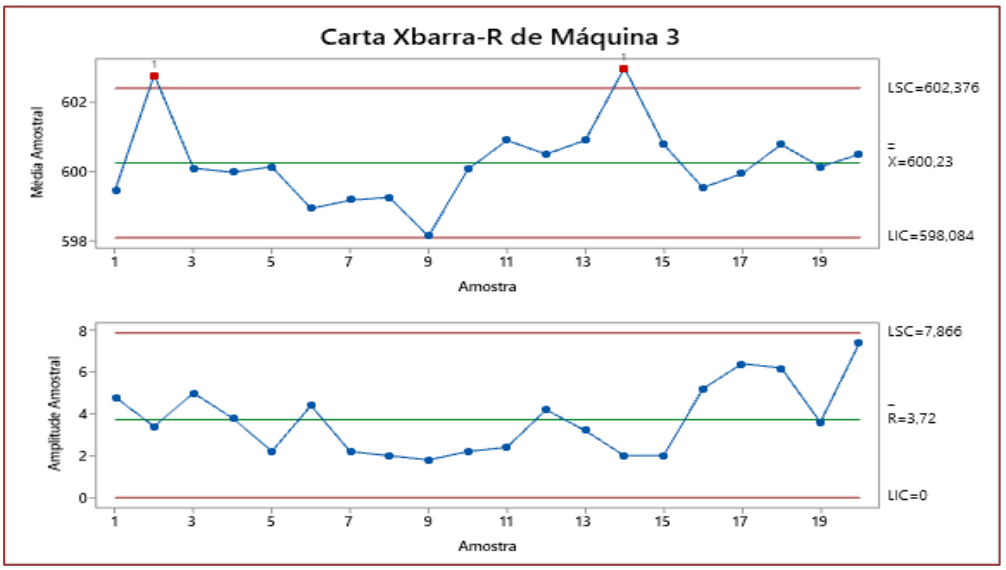

Fonte: Autores (2024).

**Figura 2.:** Carta $\overline{X}$ R da Máquina 2 para Monitorar o Processo Produtivo




Fonte: Autores (2024).

**Figura 3.:** Carta $\overline{X}$ R da Máquina 3 para Monitorar o Processo Produtivo




Fonte: Autores (2024).

- Resultados do Teste para a Carta Xbarra de Máquina 1

Teste 1. Um ponto mais que 3,00 desvios padrão da linha central.

O teste falhou nos pontos: 8

e

- Resultados do Teste para a Carta Xbarra de Máquina 3

Teste 1. Um ponto mais que 3,00 desvios padrão da linha central.

O teste falhou nos pontos: 2; 14

## 5. CONCLUSÔES

Nessa aplicação específica das Cartas de Controle da Média e da Amplitude houve pontos fora dos Limites Superior e Inferior de Controle nas Máquinas 1 e 3, somente na Máquina 2 não houve pontos fora. Portanto agora a empresa possui informações para verificar o que realmente ocorre e tomar as devidas providências.

## REFERENCIAS

[1] Guthrie, B., Love, T., Fahey, T., Morris, A., & Sullivan, F. (2005). Control, compare and communicate: Designing control charts to summarise efficiently data from multiple quality indicators. In *Quality and Safety in Health Care* (Vol. 14, Issue 6, pp. 450–454). https://doi.org/10.1136/qshc.2005.014456

[2] Ignácio, S. A. (2010). Importância da Estatística para o Processo de Conhecimento e Tomada de Decisão. *Revista Paranaense de Desenvolvimento*, *118*, 175–192.

[3] Lima, A. A. N. ;, Lima, J. R. ;, Silva, J. L. ;, Alencar, J. R. B. ;, Soares-Sobrinho, J. L. ;, Lima, L. G. ;, & Rolim-Neto, P. J. (2006). Aplicação do controle estatístico de processo na indústria farmacêutica. *Journal of Basic and Applied Pharmaceutical Sciences*, *27*, 177–187.

[4] Mertens, K., Decuypere, E., De Baerdemaeker, J., & De Ketelaere, B. (2011). Statistical control charts as a support tool for the management of livestock production. In *Journal of Agricultural Science* (Vol. 149, Issue 3, pp. 369–384). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/S0021859610001164

[5] Milan, M., Alves, R., & Fernandes, T. (2002). QUALIDADE DAS OPERAÇÕES DE PREPARO DE SOLO POR CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO. *Scientia Agricola*, *59*, 261–266. https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000200009

[6] Montgomery, D., & Runger, G. (2021). *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros* (7th ed., Vol. 1). LTC.

[7] Sánchez-Fernández, A., Baldán, F. J., Sainz-Palmero, G. I., Benítez, J. M., & Fuente, M. J. (2018). Fault detection based on time series modeling and multivariate statistical process control. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *182*, 57–69. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2018.08.003

[8] Shafqat, A., Hussain, J., Al-Nasser, A. D., & Aslam, M. (2018). Attribute control chart for some popular distributions. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, *47*(8), 1978–1988. https://doi.org/10.1080/03610926.2017.1335414

[9] Subramani, J., & Balamurali, S. (2012). Control Charts for Variables with Specified Process Capability Indices. *International Journal of Probability and Statistics*, *2012*(4), 101–110. https://doi.org/10.5923/j.ijps.20120104.03

[10] Violante, J. P. C., Machado, M. A. G., Mendes, A. dos S., & Almeida, T. S. (2024). An Interface to Monitor Process Variability Using the Binomial ATTRIVAR SS Control Chart. *Algorithms*, *17*(5). https://doi.org/10.3390/a17050216

[11] Yang, J. (2008). Managing knowledge for quality assurance: An empirical study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *25*(2), 109–124. https://doi.org/10.1108/02656710810846907

# Capítulo 9

## *Mapeamento de processos de negócio em um distribuidor de produtos e componentes de fluido industrial*

*Luciano Trentin*
*Moacir Marques*

Resumo: Este estudo visa desenvolver um modelo abrangente de processos de negócios que integre os requisitos de certificação ABNT NBR ISO 9001:2015. O método empregado é uma pesquisa aplicada, em uma empresa de distribuição de produtos e componentes para distribuição de fluídos industriais na região sul do Brasil. A coleta de dados foi realizada por meio da utilização da técnica de grupo focal, estudos de literatura e observações, analisados, classificados, modelados e validados. Esta pesquisa mapeia processos de negócios de nível 0 (função), nível 1 (processo) e nível 2 (subprocesso) com uma abordagem de cadeia de valor. Como resultado, o estudo apresenta o diagrama da cadeia de valor e o mapeamento de processo de negócio primário, de suporte e de gerenciamento da referida empresa, bem como a aplicação dos princípios do sistema de gestão da qualidade, por intermédio da normativa ABNT NBR ISO 9001:2015 e sua respectiva abordagem de melhoria contínua dos processos de negócio. Constatou-se 3 categorias de processos neste segmento de negócio, 13 processos primários, 13 processos de apoio e 2 processos de gerenciamento, além de 81 processos de negócio e demais subprocessos. O estudo evidenciou também a relevância da efetiva participação dos diretores, gerentes e especialistas em todo o desenvolvimento da cadeia de valor e seus respectivos processos.

Palavras-chave: processos de negócio, cadeia de valor, ABNT NBR ISO 9001:2015.

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade do desenvolvimento da gestão de processos empresariais e da utilização de suas respectivas práticas origina-se essencialmente das transformações constantes nas condições dos negócios, decorrente das convenções sociais, do desenvolvimento tecnológico, bem como do processo de integração econômico, social e cultural do espaço geográfico em escala mundial e mudanças nos próprios princípios da concorrência (Szelągowski, 2017).

Para Porter (1989) as organizações necessitam organizar todos os seus processos, analisando as relações existentes em cada um deles e quais podem gerar valor ao cliente. A cadeia de valor representa o conjunto de atividades empreendidas por uma organização, englobando os vínculos existente entre os fornecedores, ciclos operativos, vendas e distribuição. Ao decompor as atividades de importância estratégica de uma organização, torna-se necessário analisar o comportamento de custos e os potencias de diferenciação de cada processo de negócios, otimizando o valor final que o seu serviço e ou produto representa para o cliente (Porter, 1989).

Nessa perspectiva, o *Business Process Management* [BPM] ou modelo de processos de negócio, contribui para a potencialização dos resultados das organizações por intermédio da otimização e melhorias dos processos de negócios. O BPM é considerado um método estruturado para a modelagem de processos de negócios, com o objetivo de melhorar a agilizar os processos operativos, a qualidade e a eficiência de uma organização. Este método baseia-se na descrição do processo através de diversos elementos (ações, dados, eventos, custos, materiais, etc.) inerentes ao processo (Froger *et al.*, 2019).

O *Business Process Management* [BPM] contribui para gerenciar o fluxo de dados e informações nos diferentes tipos de organizações para que tenha potencial de aumentar a produtividade e reduzir custos operativos. No entanto, nem todas as organizações possuem um modelo de processos de negócios padronizado e eficiente. Além disso, o BPM fornece clareza sobre o escopo de trabalho das áreas/funções, para esclarecer as regras, especialmente sobre os principais processos que afetam a satisfação e criam valor para o cliente (Rosita, 2022).

De acordo com *Global Market Outlook* (2022) o direcionamento escolhidos por muitas empresas no Brasil e mundo foi o de ampliar a automatização de seus processos por intermédio da implantação do *Business Process Management* [BPM]. O relatório emitido pela *Globe Newswire - ResearchAndMarkets.com* (2017-2026) sugere que o mercado global de gerenciamento de processos de negócios foi responsável por US$ 7,34 bilhões em 2017 e deverá crescer a uma taxa de crescimento anual composta de 15,5% para atingir US$ 26,76 bilhões até 2026.

À vista disso, na contemporaneidade, sistemas de gestão voltados a definir processos, responsabilidades e procedimentos necessários para garantir a qualidade dos serviços e ou produtos, além de promover a melhoria contínua, atendimento aos requisitos de clientes e de entidades externas não são considerados apenas uma opção, mas sim uma imposição mercadológica para obter um desempenho sustentável a longo prazo. Para Ost e Silveira (2018) a norma ABNT NBR ISO 9001:2015 contribui para uma adaptar os processos, produtos e ou serviços específicos de cada organização, proporcionando maior flexibilidade para acessar a conformidade da organização com os requisitos dos clientes. Para Ong *et al.* (2020) a norma ABNT NBR ISO 9001:2015 deve estar alinhada com os conceitos modernos de negócios e qualidade, criando valores adicionais para as organizações em todos os seus processos.

Tanto na revisão da literatura quanto nos estudos complementares realizados, foram feitos esforços para identificar pesquisas que ligassem os construtos de "*business processes management*", "*value chain*" e "ISO 9001:2015" de forma coesa ao longo das fases de implementação e manutenção da gestão por processos. No entanto, foram descobertos poucos estudos que abordem especificamente a integração destes construtos no contexto dos modelos de processos de negócio. Nesse sentido, Rosita (2022) menciona que a estruturação da cadeia de valor pode ser implantada em qualquer tipo de organização, seja ela de prestação de serviços ou fabricantes de produtos, e que o BPM é essencial para a reengenharia de processos, identificando, modelando e sugerindo novo modelos para garantir a eficiência e eficácia dos processos de negócio. Derii *et al.* (2020) afirmam que os modelos de processos de negócio devem contemplar a participação de todos as partes interessadas, bem como a necessidade de aplicar os princípios da norma ABNT NBR ISO 9001:2015 aos processos do negócio, avaliando a eficiência do mapeamento de processos de negócios, esclarecendo o escopo do trabalho e identificando e criticando o processo crítico que afeta a satisfação do cliente. Caldas (2021) destaca que a modelagem dos processos de negócio é fundamental para o crescimento e o desenvolvimento sustentável das organizações, pois existe um processo para cada atividade realizada pela empresa, resultado na necessidade de aprimoramento constante. O autor declara também a necessidade de compreender os demais métodos e ferramentas que suportam os processos organizacionais.

Portanto, há uma lacuna de pesquisa que precisa ser preenchida. Diante do exposto, surge então o seguinte problema de pesquisa: como integrar um modelo abrangente de processos de negócios com os requisitos de certificação ABNT NBR ISO 9001:2015?

Assim, o presente artigo tem como objetivo desenvolver um modelo abrangente de processos de negócios que integre os requisitos de certificação ABNT NBR ISO 9001:2015 em um distribuidor de produtos e componentes de fluido industrial. De acordo com Peirov (2023) os processos críticos estão diretamente relacionados com a criação de produtos e ou serviços, processos estes que geram valor ao cliente e por este motivo recai o peso de garantir a qualidade destes.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. *BUSINESS PROCESS MANAGEMENT* [BPM]

O conceito moderno do *Business Process Management* [BPM] teve início na década de 1990 a partir dos artigos *Reengineering Work: Don't Automate, Obliterate* de Michael Hammer e *The New Industrial Engineering: Information Technology and Business Process Redesign* de Thomas H. Davenport e James E. Short, ambos publicados na *Harvard Business Review*. O primeiro artigo propunha reavaliar e redesenhar radicalmente seus processos de negócios para alcançar melhorias significativas em desempenho e o segundo enfatizava a importância da tecnologia da informação na reengenharia de processos de negócios (England & Miller, 2015).

O *Business Process Management* [BPM] propõe-se a avaliar estrategicamente os processos que uma empresa executa e procura melhorar de modo contínuo a eficiência e eficácia dos processos de negócio, com o propósito de: (i) obter custos mais baixos; (ii) melhorar a qualidade; e (iii) ganho de produtividade e competitividade em relação a outras organizações do mesmo segmento mercadológico (Meidan *et al.*, 2017).

Apesar de van der Aalst, Hofstede Weske (2003) definirem o *Business Process Management* [BPM] como um conjunto de métodos, técnicas e *software* para (i) projetar e configurar, (ii) executar, (iii) controlar e (iv) diagnosticar processos de negócio, Kohlbacher (2010) e o BPM *Common Body of Knowledge* (BPM CBOK, 2021) consideram que o BPM com uma abordagem de gestão holística, focada em alinhar todos os aspectos de uma organização, englobando as estratégias, objetivos, cultura, estrutura organizacionais, papéis, políticas, métodos, tecnologias a fim de analisar, desenhar, implementar, gerenciar o desempenho, transformar e estabelecer a governança dos processos de negócio que agregam valor aos clientes.

Nesse sentido, destaca-se Zairi (1997), o qual menciona que o principal objetivo do O *Business Process Management* [BPM] é identificar os principais aspectos das operações do negócio onde existe uma elevada alavancagem e uma grande proporção de valor agregado. De acordo com o autor, o BPM deve ser gerido com base nas seguintes diretrizes:

- As atividades principais devem ser devidamente mapeadas e documentadas;
- Deve-se criar um foco nos clientes através de ligações horizontais entre atividades-chave;
- Utilizar-se de sistemas e procedimentos documentados para garantir disciplina, consistência e repetibilidade do desempenho de qualidade;
- Medir para avaliar o desempenho de cada processo individual, definir metas e fornecer níveis de resultados que possam atender aos objetivos corporativos;
- Basear-se numa abordagem contínua de otimização através da resolução de problemas e da obtenção de benefícios adicionais.
- Inspirar-se nas melhores práticas de mercado para garantir que a competitividade é alcançada.
- O BPM é deve ser considerado como uma abordagem para mudança cultural e não uma simples ferramenta que utiliza-se de bons sistemas e da estrutura certa.

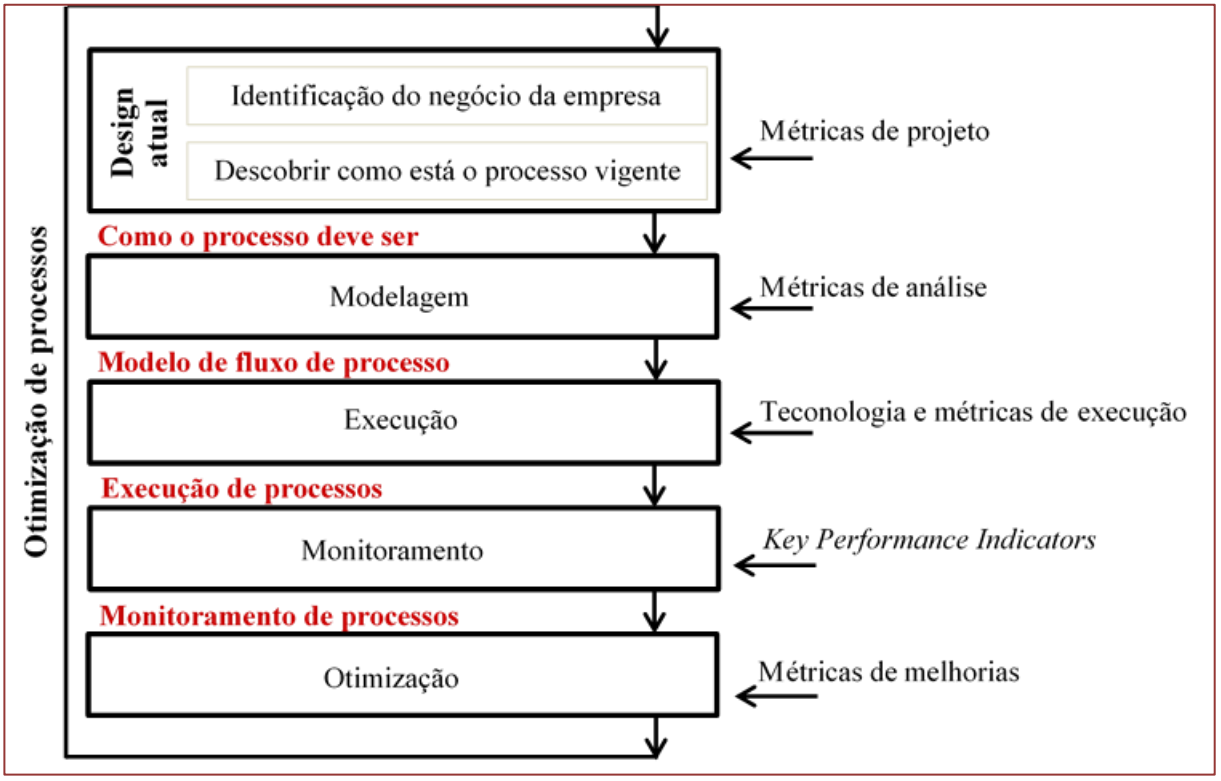
O *Business Process Management* [BPM], de acordo com a BPM *Common Body of Knowledge* (BPM CBOK, 2021) e Bernardo, Galina e Pádua (2017), é uma abordagem disciplinar ou um ciclo de vida contínuo composto por seis fases: planejamento do projeto BPM (como a empresa realizará o projeto de gestão de processos de negócio); Modelagem de processos (Identificação dos processos, detalhando o conjunto de atividades que os compõem e validação destes para garantir o correto entendimento); Simulação de processos (Simular os processos com base em medidas de desempenho, para testar o processo e verificar se ele está sendo executado conforme previsto ou se ocorrem possíveis filas ou gargalos); Execução de processos (nesta fase os processos são automatizados, implantados, executados e institucionalizados); Monitoramento de processos (Os processos devem ser acompanhados através de indicadores de desempenho previamente definidos, para verificar se houve desvios); e melhoria contínua dos processos (Na fase de melhoria é onde ocorre a avaliação da situação atual (*AS-IS*), para que sejam propostas melhorias e modelado o processo futuro (*TO-BE*) de acordo com essas melhorias).

Lamghari *et al.* (2018) mencionam que o BPM possui uma natureza multidisciplinar e pode ser aplicada em diferentes contextos por diferentes perfis de usuários. Em função desta concepção, os autores desenvolveram um conjunto de critérios (Figura 1) com o qual pode-se avaliar a modelagem de processos com base em fases e indicadores,

preconizando um método de ciclo de vida contínio para aprimorar e gerir de modo consecutivo os processos organizacionais (Bernardo, Galina, & Pádua, 2017; von Brocke & Rosemann, 2015).

Szelągowski e Lupeikiene (2020) mencionam que a melhor forma de automatizar o *Business Process Management* [BPM] é por intermédio da solução de aplicação integrada de *software* para gerenciamento de processos de negócios, denominado de *Business Process Management Suite* (ou *System*) [BPMS], o qual dá suporte tecnológico em todas as etapas de implementação do BMP, desde o mapeamento e modelagem de processos até o monitoramento do desempenho e otimização desses processos (BPM CBOK, 2021).

**Figura 1.** Ciclo de vida contínio de modelagem de processos de negócios




Fonte: adaptado de Lamghari *et al.* (2018, p. 2).

Efetivamente, as organizações estão conscientes da necessidade de implantar e implementar processos bem definidos, procurando não só aumentar o seu nível de maturidade, mas também melhorar a forma como os seus produtos e ou serviços são desenvolvidos e geridos, uma vez que na atualidade o *Business Process Management* [BPM] é considerado uma prática habitual de melhoria contínua dos processos de negócio (Gadatsch, 2023).

vom Brocke, Zelt e Schmiedel (2016) mencionam que o BPM é uma abordagem com elevado contributo de valor para identificar os processos principais do negócio (*core business processes*), oferecendo oportunidades de diferenciação com o objetivo de compatibilizar o que a empresa oferece e o que o cliente considera particularmente essencial.

## 2.2. CADEIA DE VALOR

O conceito de cadeia de valor, foi criado Michael Porter, na década de 1980, em seu livro *Competitive advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*, para retratar todo o conjunto de atividades necessárias para desenvolver um produto ou serviço desde a sua concepção, passando pelas fases de produção dispares, distribuição aos consumidores e disposição final após o uso (Barney & Hesterly, 2011; Porter, 1989; Silva, 2004). Hellin e Meijer (2006) mencionam que conforme um produto passa de uma etapa da cadeia para outra, pressupõe-se que ele ganhe valor. A cadeia de valor pode ser empegue como uma ferramenta para fragmentar um negócio em processos e atividades indispensáveis, permitindo assim o reconhecimento de possíveis fontes de vantagem competitiva (Brown & McDonald, 1994). Para Couto, Britto e Schnorrenberger (2013, p. 147) a vantagem competitiva "é uma maneira genérica de dizer que uma organização possui diferenciais sustentáveis no longo prazo perante aos demais competidores do mercado de atuação".

A cadeia de valor consiste nas atividades coordenadas que, por processos específicos, geram produtos com valores intangíveis e de mercado (FIA/USP, 2021). A cadeia de valor inicia-se nos sistemas de produção da matéria-prima e se moverá ao longo das ligações com outras empresas envolvidas na distribuição, comércio, montagem, processamento, entre outas (Kumar & Rajeev, 2016). A cadeia de valor genérica descrita por Porter é comporta por: Atividades Primárias (Logística de entrada; Operações; Logística de saída; *Marketing* e Vendas; Serviços/ Margens); e Atividades de Apoio (Infraestrutura; Gestão de Recursos Humanos; Desenvolvimento de Tecnologias; Aquisição) (Robben & Silva, 2023).

A análise da cadeia de valor requer o mapeamento do mercado para acompanhar e analisar a contribuição dos diferentes intervenientes na cadeia e as relações entre si. Uma compreensão das interações dentro de uma cadeia de valor ajuda a identificar os fatores que influenciam o quão bem ou mal a cadeia funciona. O mapa de mercado resultante define os intervenientes na cadeia de valor, o ambiente favorável e os prestadores de serviços. O ambiente favorável inclui fatores críticos que criam as condições operacionais dentro das quais a cadeia de valor opera, tais como infraestruturas, políticas e regulamentos, bem como instituições e processos que moldam o ecossistema de mercado (Zamora, 2016).

A maioria dos estudos sobre cadeias de valor concentra-se no ponto de vista intraempresa, consistente com o conceito original de cadeia de valor de Porter (Fearne *et al.*, 2012). No entanto, as cadeias de valor são agora cada vez mais vistas como sistemas de múltiplas empresas, onde cada empresa reconhece a necessidade de estratégias harmonizadas ao longo da cadeia operativa. Isto contribui para parcerias mais fortes entre os intervenientes na cadeia e, em última análise, resulta em maiores benefícios para os clientes (Rose & Stevels, 2000).

De acordo com Teixeira (2019) ao mapear sua cadeia de valor, você terá um verdadeiro instrumento de análise para posicionar seu negócio em vantagem e diferenciá-los de seus concorrentes, criando assim uma vantagem competitiva sobre a concorrência, mais conhecimento sobre o contexto do negócio, controle orçamentário mais preciso e a criação de um negócio menos sujeito a imprevistos (FIA/USP, 2021).

## 2.3. NORMA ABNT NBR ISO 9001:2015

Para que a sua organização seja capaz de se sustentar a longo prazo e se manter competitiva no mercado, é essencial adotar normas que contribuam para garantir a qualidade de seus processos (Corrêa, 2021).

Organizações com gestão voltada para a qualidade, de acordo Carpinetti e Gerolamo (2016), preocupam-se fundamentalmente em desenvolver processos mais econômicos e eficientes, mas também em exercer suas atividades dentro de elevados padrões de rigor técnico. Nesse sentido, a certificação ISO 9000 pode ser uma grande aliada de sua organização. A normativa assegura que o seu modelo de negócio cumpre uma série de normas e diretrizes internacionalmente reconhecidas, garantindo assim uma gestão de qualidade eficaz (Corrêa, 2021).

A prestabilidade dos padrões ISO se estende aos ambientes operativos, tanto privados quanto públicos, tornando-os os processos de negócio mais seguros, eficientes e transparentes (Wicher, 2018). Todas as atividades que envolvem a ISO originam-se de acordo internacionais que são publicados como Normas Internacionais. O Brasil participa da ISO por intermédio da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As normativas ABNT são legitimadas pelo governo federal como Normas Brasileira (NBR) (ABNT, 2024).

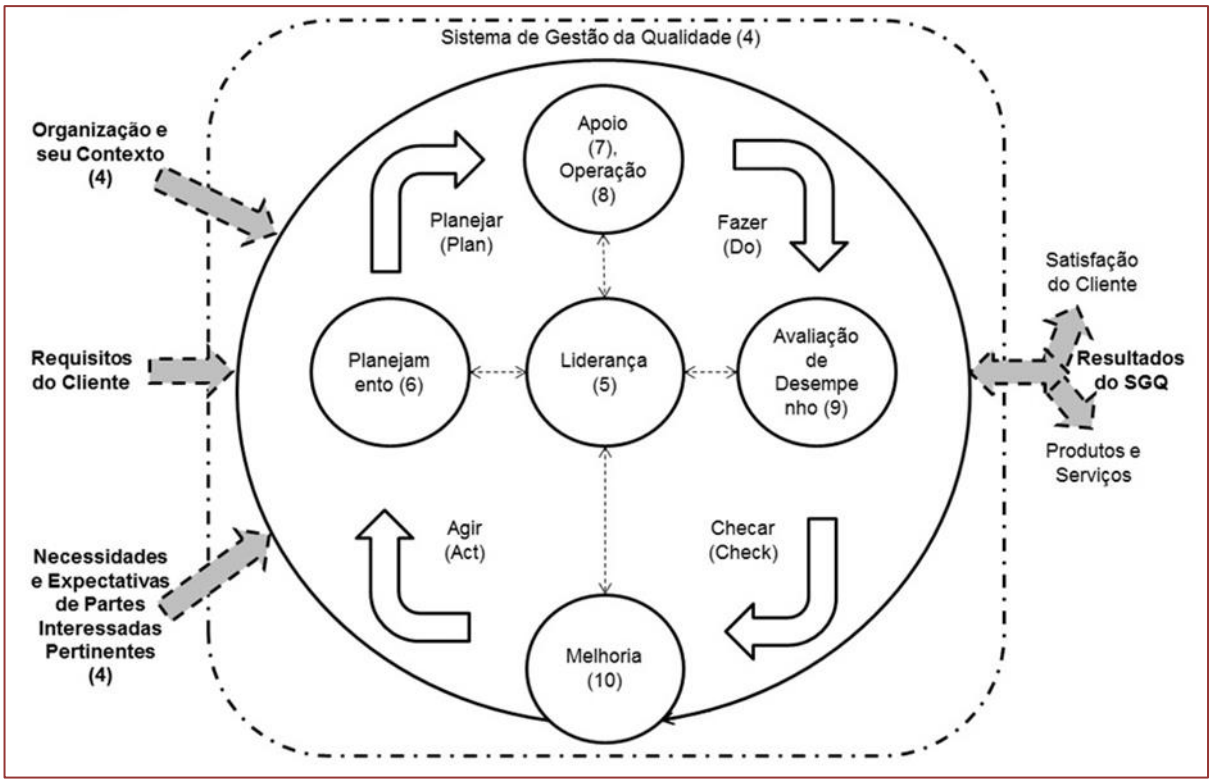
As normas ISO, na totalidade, são avaliadas no ínterim de cinco anos e, se imperioso, revisadas. Esso processo de revisão quinquenal contribui para garantir que estas continuem sendo ferramentas importantes para o mercado. Os desafios enfrentados na contemporaneidade por organizações e negócios são bem distintos dos de alguns decênios anteriores (Bertolino & Couto, 2019).

O aumento da globalização, mudou a forma como fazemos negócios, e hoje as organizações operam cadeias de abastecimento cada vez mais complexas do que empreendiam no passado. Ademais, existe um aumento na expectativa de clientes e outros grupos de interesses, e - com mais acesso à informação - a sociedade de maneira geral possui no presente uma representatividade mais forte do que nunca (Carpinetti & Gerolamo, 2016).

Nesta perspectiva, a ISO 9001 foi atualizada para levar em consideração esta nova conjuntura, devendo refletir estas mudanças para que permaneça relevante. Apesar da publicação da nova versão da normativa ter sido realizada no mês de setembro de 2015, as organizações tiveram um período estimado de 3 anos, para adaptação e certificação de seus sistemas (ISO, 2022).

Na Figura 2 pode observar a nova estrutura da norma ISO 9001:2015.

**Figura 2.** Representação da estrutura da ISO 9001:2015




Fonte: adaptado da ISO (2015, p. 10).

Um dos primeiros passos para implantação do Sistema consiste na aplicação das regras contidas no manual da norma. Além disso, importante se faz destacar que a ISO 9001:2015 aplica em seu sistema um dos mais conhecidos métodos de eficiência conhecidos na administração, o ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) (Mançu, Gouveia, & Cordeiro, 2019).

A norma ISO 9001:2015 promove a adoção da abordagem de processo no desenvolvimento, implementação e melhoria da eficácia de um sistema de gestão da qualidade, para aumentar a satisfação do cliente pelo atendimento aos requisitos do cliente.A norma ISO 9001:2015 (no Brasil e chamada de ABNT NBR ISO 9001:2015) é constituída por um número de diferentes seções, sendo cada uma delas voltada a um requisito envolvido, como veremos a seguir na Tabela 1 (ISO, 2015).

**Tabela 1.** Principais estímulos para a implementação da ISO 9001

| Cláusula | Descrição |
|---|---|
| Cláusula 4 | Contexto da organização: É preciso num primeiro momento, compreender a organização dentro de cada contexto. Deste modo, as necessidades e expectativas das partes interessadas determinarão o alcance do sistema de gerenciamento das aplicações. A organização, por sua vez, deve determinar as questões a serem resolvidas, representando os impactos gerados e obtendo os resultados esperados. |
| Cláusula 5 | Liderança: É a reiteração de políticas, funções, responsabilidades e autoridades da organização, enfatizando não só a liderança de gestão, mas também, a gerência sênior que terá maior participação. Esta cláusula tem o objetivo de informar a todos os membros da organização a importância do sistema de gestão e incentivar a atuação em todo o processo. |
| Cláusula 6 | Planejamento: Tem como objetivo incluir o sistema de gestão de prevenção e discutir os riscos, assim como as oportunidades que possam vir de encontro às organizações, focando na facilidade de ações preventivas e/ou corretivas. |
| Cláusula 7 | Suporte: Falar sobre questões como recursos, competência, consciência, comunicação ou informação documentada, constituindo suporte necessário para atender aos objetivos organizacionais. |
| Cláusula 8 | Operação: Processo no qual os planos da organização controlam os processos internos curta, é, porém, aquela que mais carece de disciplina. |
| Cláusula 9 | Avaliação de Desempenho: Parte em que se faz referência ao monitoramento, medição, análise e avaliação, auditoria interna e revisão. Este procedimento visa a comprovação do rendimento e determina "o que", "como" e "quando", de acordo com as exigências da Supervisão. As auditorias internas, por sua vez, obtêm informações sobre o sistema de gestão através das exigências dos requisitos da organização e do Estado, aplicando-se a um formato eficaz de Sistema de Gestão. |
| Cláusula 10 | Melhorias: Busca-se abordar as não-conformidades, assim como as ações corretivas e a melhoria contínua, de modo a proporcionar melhorias reais. Desse modo, pode-se enfrentar as não-conformidades com ações mais precisas e eficazes. |

Fonte: adaptado da ISO (2015, p. 1-22).

## 3. METODOLOGIA

O mapeamento de processos de negócios é realizado no modelo de Processos de Alto Nível – Nível 0, Processo – Nível 1 e Subprocesso – Nível 2. Os níveis de processos de negócios 0, 1 e 2 são mapeados conforme mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Ferramentas de mapeamento de processos de negócios

| Nível | Mapeamento | Meta e Medidas | Ferramentas |
|---|---|---|---|
| 0 | Função | Metas Organizacionais e Medidas de Sucesso Organizacional | Cadeia de valor |
| 1 | Processos | Metas do Processo e Medidas de Sucesso do Processo | BPMS |
| 2 | Subprocessos | Metas de atividade e medidas de sucesso da atividade | BPMS |

Fonte: adaptado da Rosita (2022, p. 2243).

O mapeamento do processo é realizado em 2 (duas) etapas, que são processo de coleta e análise de dados. A etapa de coleta de dados é realizada para que os dados e ou informações obtidas sejam precisas e representem todos os aspectos do escopo do estudo. Os métodos de coleta de dados utilizados são:

- Grupo Focal: Foram realizadas discussões em grupo focal com os 04 gestores (diretores, gerentes e especialistas) responsáveis representantes de processos de negócios de todos áreas relevantes para obter uma visão geral dos processos de negócios. Os objetivos do grupo focal são explorar a lista de atividades, descobrir

a relação entre atividades, relação ou fluxo de dados/informação/documento/dinheiro dentro e entre as áreas relevantes do negócio. A duração do grupo focal varia entre 2 e 3 horas para cada área relevante;

- Revisão da Literatura: O documento revisado inclui políticas aplicáveis na organização, estrutura organizacional, planos de desenvolvimento de longo prazo, planos estratégicos, objetivos de qualidade e descrições de cargos. Esses documentos são cruzados com a respectiva literatura (periódicos, livros, requisitos legais, entre outros);
- Observação: Cada representante de processo de negócios detalha o modelo de processo de negócios em cada área. Cada processo no nível 1, dividido em subprocessos por subordinados. Os gestores observam e esclarecem o mapeamento dos subprocessos.

A análise, neste caso, concentra-se mais em compreender, mapear e melhorar os Processos de Negócio da organização para que as recomendações sejam aplicáveis e eficazes na implementação. A técnica de análise de dados e informações consiste nas 3 (três) etapas abaixo descritas:

- Análise Causal: estuda-se uma relação lógica entre afirmações, fatos ou dados e as informações obtidas;
- Classificação de Processo: A identificação do processo a partir dos dados e ou informações coletadas é classificada e mapeada de acordo com a definição dos processos principais ou processos de suporte;
- Modelagem de Processos: A cadeia de valor é uma das plataformas utilizadas nesta fase. Após obter um modelo de processo de alto nível (documento de nível 0), prossiga com a modelagem de processos (documento de nível 1) e modelagem de subprocessos (documento de nível 2). Para realizar a modelagem do nível 1 e nível 2 utilizar-se-á o *software Business Process Management Suite* [BPMS]. Na modelagem de subprocessos, cada representante de processos de negócios detalha o modelo de processos de negócios de forma independente com colegas da mesma área de atuação.
- Validação: nesta etapa, o modelo de processos de negócios é validado horizontalmente em conjunto com os demais aéreas envolvidas, tanto da área que fornece os insumos, quanto dos parceiros no processo, ou da área que recebe os resultados. A validação vertical é realizada no nível da alta administração e de especialistas externos em modelagem de processos.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. MODELO DE PROCESSO DE NEGÓCIOS: ALTO NÍVEL – NÍVEL 0

O mapeamento dos processos de negócio da empresa de distribuição de produtos e componentes para distribuição de fluídos industriais iniciou-se com a análise da cadeia de valor com base nas seguintes premissas:

- Os processos de negócio de uma organização podem ser categorizados em três categorias de acordo com o BPM CBOK Version 4.0 (2021):

a) Processo primário: é um processo tipicamente interfuncional ponta a ponta (e até interorganizacional ponta a ponta) que agrega valor diretamente para o cliente;

b) Processo de suporte: existe para prover suporte a processos primários, mas também pode prover suporte a outros processos de suporte (processos de suporte de primeiro nível, segundo nível, terceiro nível e sucessivos) ou processos de gerenciamento;

c) Processo de gerenciamento: tem propósito de medir, monitorar, controlar atividades e administrar o presente e o futuro do negócio. Processos de gerenciamento, assim como processos de suporte, não agregam valor diretamente para os clientes.

- Os processos primários foram descritos com base na cadeia de valor tradicional proposto por Porter (1989). Os processos primários de acordo com a cadeia de valor de Michel Porter, são: logística de entrada; operações; logística de saída; *marketing* e vendas; e serviços pós-vendas.
- O mapa de processos de negócios pode ser dividido em quatro níveis, que são Nível 0 (função), Nível 1 (processo) e Nível 2 (subprocesso). A estrutura da cadeia de valor é apropriada para ajudar a identificar mapas de processos empresariais de Nível 0.

Os processos primários, de suporte e de gerenciamento foram identificados mediante reuniões realizadas com o grupo focal, sejam elas no formato individual ou coletivo, referenciando-se ao conceito de cadeia de valor de Porter (1989), focado em uma visão "de dentro para fora" (*inside out*) da organização.

- Processo primário é composto por:

a) Logística de entrada (envolve relacionamento com fornecedores e inclui todas as atividades necessárias para transportar, receber e armazenar): produtos e componentes.

b) Operações (envolve relacionamento com fornecedores e clientes e inclui todas as atividades necessárias para comprar, transportar, receber, armazenar; e distribuir): planejamento logístico; recebimento; movimentação interna; armazenamento; separação e remessa de produtos e componentes; redes de relacionamento; desenvolvimento e execução de montagem de projetos especiais.

c) Logística de saída (atividades necessárias para coletar, separar e distribuir): produtos, componentes e projetos especiais.

d) *Marketing* e vendas (atividades de apresentar, diferenciar e promover os produtos e serviços, atuando na conquista direta do cliente e no fechamento de novos negócios): desenvolvimento de marca e desenvolvimento de mercado.

e) Serviços (atividades necessárias para manter o produto e ou serviço funcionando de forma eficaz para o cliente após o processo de venda e entrega): consultoria técnica e instalação.

- Processo de suporte é composto por:

a) Compras (aquisição de insumos, matéria-prima ou recursos para a organização): credenciamento, compras e avaliação de fornecedores.

b) Gestão de recursos humanos (atividades que incluem R&S, T&D, remuneração e processos administrativos e legais): captação, retenção, desenvolvimento e ambientação de talentos.

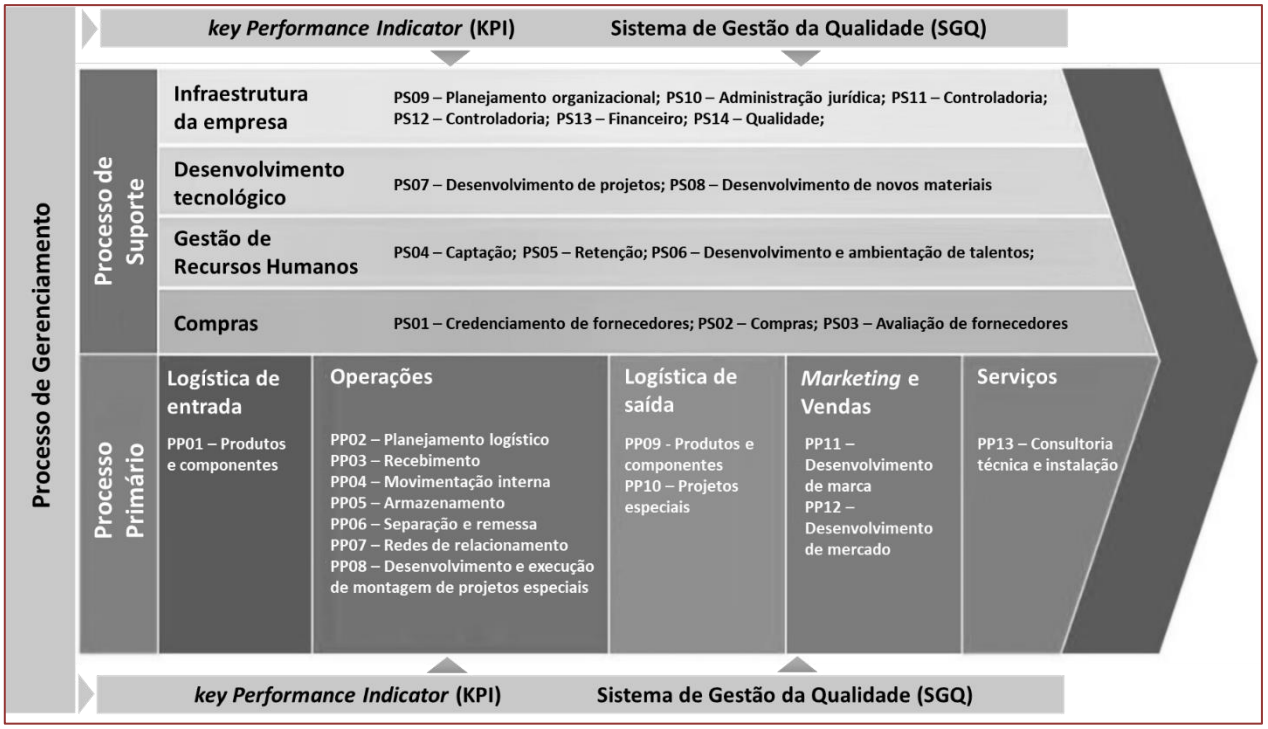
c) Desenvolvimento tecnológico (relacionado a produtos e componentes, projetos, procedimentos e conhecimentos técnicos de materiais): desenvolvimento de projetos e desenvolvimento de novos materiais.

d) Infraestrutura da empresa (um conjunto de funções ou áreas): planejamento organizacional, administração jurídica, controladoria, financeiro e qualidade.

- Processo de gerenciamento é composto por: medir, monitorar, controlar atividades e melhorar continuamente os processos de negócio. O processo de gerenciamento utiliza-se de *Key Performance Indicators* [KPI] para fazer contribuições significativas quanto ao avanço do conhecimento no efetivo método para avaliar o desempenho, o progresso e os resultados (Aithal & Aithal, 2023) durante o processo de implantação e implementação dos processos de negócio.

Na Figura 3 apresenta-se um diagrama da cadeia de valor da empresa de distribuição de produtos e componentes para distribuição de fluídos industriais.

**Figura 3.** Cadeia de valor




Fonte: adaptado de Porter (1989).

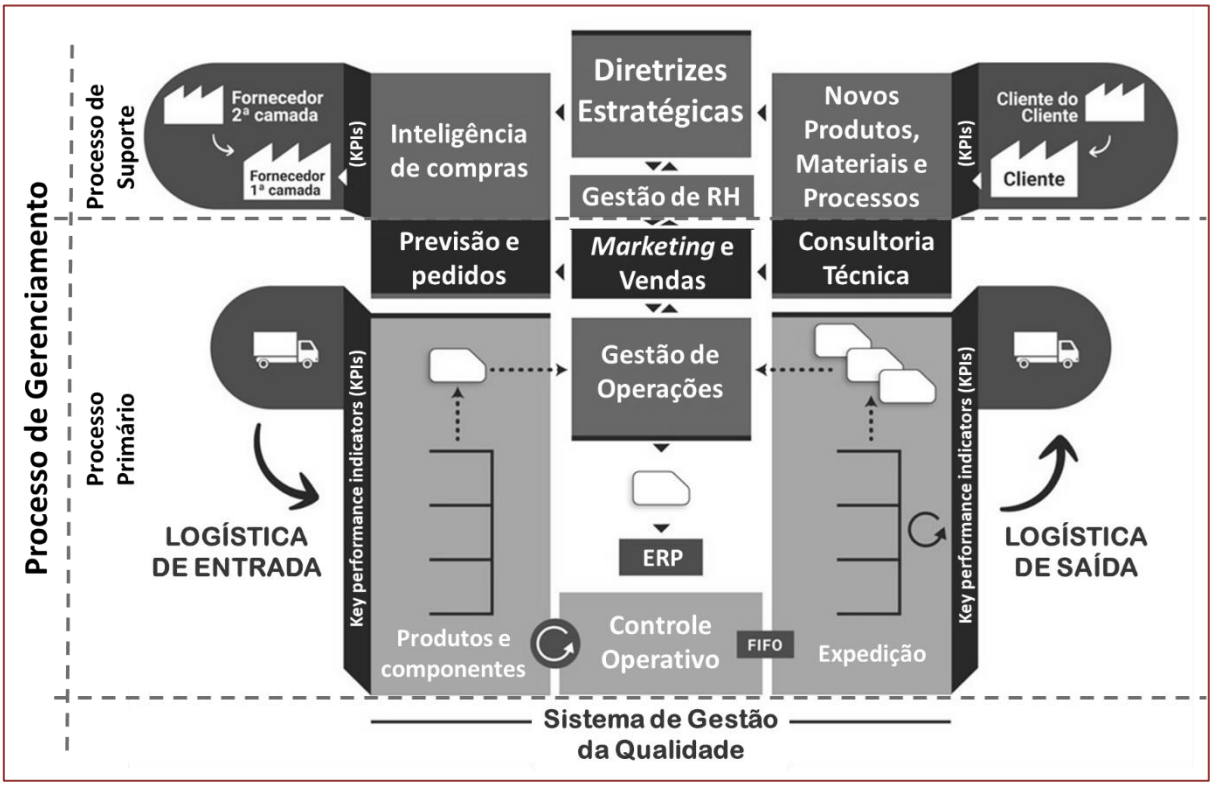
## 4.2. MODELO DE PROCESSO DE NEGÓCIOS: PROCESSOS – NÍVEL 1 E SUBPROCESSOS – NÍVEL 2

A fim de facilitar a compreensão do fluxo de valor, foi realizada uma análise causal da modelagem de processos de negócio por intermédio do *software Business Process*

*Management Suite* [BPMS], descrevendo a sequência de processos primários estabelecidos no Nível 1 (desde o PP01 – Produtos e Componentes até o PP13 – Consultoria Técnica e Instalação) e a descrição dos processos de suporte determinados no Nível 2 (desde o PS01 – Credenciamento de Fornecedores até o PS13 – Qualidade), além dos processos de gerenciamento (Sistema de Gestão da Qualidade e *Key performance indicators*).

A Figura 4 ilustra o mapeamento de Processos de Negócios: Processos Nível 1, Subprocesso de Suporte Nível 2 e Processo de Gerenciamento.

**Figura 4.** Mapeamento de Processo de Negócio Primário, de Suporte e de Gerenciamento




Fonte: elaborado pelo autores (2024).

A modelagem dos subprocesso foi baseada mediante observações de cada área e então validada horizontalmente (respectivos departamentos no mesmo nível) e verticalmente (pela alta administração e especialistas externos em modelagem de processos).

## 4.3. CONTROLE DO MAPEAMENTO DO PROCESSO DE NEGÓCIO

Todos os processos foram planejados, descritos e adequados aos requisitos da normativa ABNT NBR ISO 9001:2015, com o objetivo de garantir o fluxo de trabalho, o entendimento dos envolvidos e suas contribuições e o impacto causado no processo como um todo, a fim de criar ou entregar os produtos, componentes e serviços do início ao fim, transformando

insumos (*inputs*) em produtos (*outputs*), atendendo assim as necessidades e expectativas das partes interessadas.

Após o desenvolvimento da cadeia de valor da empresa de distribuição de produtos e componentes para distribuição de fluídos industriais, pode-se observar três categorias de processos neste segmento de negócio: processo primário; processo de suporte; e processos de gerenciamento. No mapeamento de processo negócio Nível 1, constatou-se a existência de 13 processos primários, 13 processos de apoio e 2 processos de gerenciamento, além de 81 processos de negócio e demais subprocessos documentados como procedimentos operacionais e diretrizes.

Na Tabela 3 é apresentado o controle do mapeamento do processo de negócio resumidamente.

**Tabela 3.** Resumo do controle do mapeamento do processo de negócio

| Categoria | Subcategoria | Código | Função | Subtotal de processos |
|---|---|---|---|---|
| Processo Primário | Logística de entrada | PP01 | Produtos e componentes | 1 |
| | Operações | PP02 | Planejamento logístico | 2 |
| | | PP03 | Recebimento | 2 |
| | | PP04 | Movimentação interna | 3 |
| | | PP05 | Armazenamento | 2 |
| | | PP06 | Separação e remessa | 3 |
| | | PP07 | Redes de relacionamento | 3 |
| | | PP08 | Desenvolvimento e execução de montagem de projetos especiais | 8 |
| | Logística de saída | PP09 | Produtos e componentes | 1 |
| | | PP10 | Projetos especiais | 5 |
| | *Marketing* e Vendas | PP11 | Desenvolvimento de marca | 3 |
| | | PP12 | Desenvolvimento de mercado | 2 |
| | Serviços | PP13 | Consultoria técnica e instalação | 5 |
| Processo de Suporte | Compras | PS01 | Credenciamento de fornecedores | 1 |
| | | PS02 | Compras | 4 |
| | | PS03 | Avaliação de fornecedores | 1 |
| | Gestão de Recursos Humanos | PS04 | Captação | 2 |
| | | PS05 | Retenção | 2 |
| | | PS06 | Desenvolvimento e ambientação de talentos | 2 |
| | Desenvolvimento tecnológico | PS07 | Desenvolvimento de projetos | 5 |
| | | PS08 | Desenvolvimento de novos materiais | 4 |
| | Infraestrutura da empresa | PS09 | Planejamento organizacional | 2 |
| | | PS10 | Administração jurídica | 1 |
| | | PS11 | Controladoria | 2 |
| | | PS12 | Financeiro | 2 |
| | | PS13 | Qualidade | 13 |
| Processo de Gerenciamento | Sistema de Gestão da Qualidade | - | ABNT NBR ISO 9001:2015 | - |
| | *key Performance Indicator* | - | Indicadores estratégicos, táticos e operacionais. | - |

Fonte: dados da pesquisa (2024).

Com base na normativa ABNT NBR ISO 9001:2015, item 7.5.3 Controle de informação documentada, todas as informações referente ao mapeamento do processo de negócio foram organizadas e documentadas. De acordo com o referido item normativo, as informações, documentos e registros devem estar disponíveis, protegidos e precisam ser confiáveis (ISO, 2015).

## 5. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo desenvolver um modelo abrangente de processos de negócios que integre os requisitos de certificação ABNT NBR ISO 9001:2015. Pode-se presumir que a análise da cadeia de valor é uma abordagem útil e prática para compreender as relações, componentes e intervenientes dentro de uma empresa de distribuição de produtos e componentes para distribuição de fluídos industriais, seja de uma perspectiva local ou de um ponto de vista sistêmico.

O modelo de cadeia de valor proposto, foi constituído utilizando-se todas as fases do ciclo de vida contínuo do *Business Process Management* [BPM]: Planejamento; Modelagem; Simulação; Execução; Monitoramento; e Melhoria contínua, demonstrando que cada fase é representada na forma de um processo específico.

Mediante resultados, com base no modelo de cadeia de valor proposto por Porter (1989), constatou-se 3 categorias de processos neste segmento de negócio, 13 processos primários, 13 processos de apoio e 2 processos de gerenciamento, além de 81 processos de negócio e demais subprocessos.

O estudo evidenciou também a relevância da efetiva participação dos diretores, gerentes e especialistas em todo o desenvolvimento da cadeia de valor e seus respectivos processos, bem como a pertinência de aplicação dos princípios do sistema de gestão da qualidade, por intermédio da normativa ABNT NBR ISO 9001:2015 e sua respectiva abordagem de estruturação planejada e de melhoria contínua dos processos de negócio.

A contribuição teórica deste estudo é significativa, pois expande a teoria existente de mapeamento dos processos de negócio, com base na cadeia de valor de uma empresa de distribuição de produtos e componentes para distribuição de fluídos industriais, com enfase um sistema de gestão comprovadamente evicaz na melhoria contínua dos processos organizacionais.

Em um nível prático, com a efetiva implementação do *Business Process Management* [BPM], os gestores podem capacitar as suas equipes, promover uma cultura de melhoria contínua, a fim de compreendee melhor as nuanças dos processos que envolvem a organização, corrigindo possíveis distorções e efetuando mudanças capazes de torná-los mais otimizados.

Como recomendação para novos estudos, sugere-se que esta pesquisa seja replicada em outras empresa do mesmo segmento mercadológico, excetuando-se algumas particularidades, a exemplo da parte de desenvolvimento de projetos específicos. Afinal, os resultados encontrados nesta pesquisa não podem ser generalizados, e sua aplicação e expansão em outras áreas, com características diversas, contribuiriam para a compreensão e amadurecimento teórico e empírico sobre o tema, uma vez que a práxis de mapeamento e gestão de processos de negócio está em constante evolução.

## REFERÊNCIAS


[1] Aithal, P. S., & Aithal, S. (2023). Key performance indicators (KPI) for researchers at different levels & strategies to achieve it. *International Journal of Management, Technology, and Social Sciences (IJMTS), 8*(3), 294-325.

[2] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Quem somos. Institucional*. 2024. Disponível em: https://www.abnt.org.br/institucional/sobre. Acessado em: mai/24.

[3] Barney, J. B. & Hesterly, W. S. (2011). Administração estratégica e vantagem competitiva. 3ª edição. Editoria Pearson Universidades, 432p.

[4] Bernardo, R., Galina, S. V. R., & Pádua, S. I. D. D. (2017). The BPM lifecycle: How to incorporate a view external to the organization through dynamic capability. *Business Process Management Journal, 23*(1), 155-175.

[5] Bertolino, M. T. & Couto, M. (2019). *Sistemas de gestão integrados ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001: gestão da qualidade, ambiental e da segurança e saúde ocupacional com foco em resultados*. 1ª edição. Editora Qualitymark, 256p.

[6] BPM CBOK (Version 4.0) (2021). *Association of Business Process Management Professionals International*- Portuguese Version. Editora Independently Published, 480p.

[7] Brown, L. & McDonald, M. (1994). *Competitive Marketing Strategy for Europe: Developing, Maintaining and Defending Competitive Advantage*. 1ª edição. Editora Palgrave Macmillan, 384p.

[8] Caldas, E. A. C. (2021). *Implementação de uma nova descrição por processos: estudo de caso-indústria automóvel*. Dissertação de Mestrado em Gestão de Operações. Universidade Lusíada – Norte, Portugal/PT.

[9] Carpinetti, L. C. R. & Gerolamo, M. C. (2016). *Gestão da Qualidade ISO 9001:2015: Requisitos e Integração com a ISO 14001:2015*. 1ª edição. Editora Atlas, 192p.

[10] Conto, S. M., Britto, J. C., & Schnorrenberger, A. (2013). Proposta de modelo de cadeia de valor para um centro universitário. *Revista Gestão Universitária na América Latina-GUAL*, 143-159.

[11] Corrêa, T. (2021). *ISO 9000: um guia completo com tudo o que você precisa sobre essa certificação de qualidade com reconhecimento internacional*. 2021. Disponível em: https://www.siteware.com.br/qualidade/iso-9000/. Acessado em: jul/24.

[12] Derii, V. A., Parkhomets, M. K., Kovbasa, O. M., Hryzovska, L. O., & Karabanyk, S. M. (2020). Modeling business processes based on logistics concepts and quality management system principles. *International Journal of Management (IJM), 11*(7), pp. 175-188.

[13] England, L., & Miller, S. D. (2015). *Maximizing electronic resources management in libraries: Applying business process management.* 1st Edition. Publisher Chandos Publishing, 152p.

[14] FIA/USP (2021). *Cadeia de Valor: O que é, atividades, vantagens e implementação*. FIA Business School. Stratégias e Organizações. Disponível em: https://fia.com.br/blog/cadeia-de-valor/. Acessado em: jul/24.

[15] Fearne, A., Garcia Martinez, M., & Dent, B. (2012). Dimensions of sustainable value chains: implications for value chain analysis. *Supply Chain Management: An International Journal, 17*(6), 575-581.

[16] Froger, M., Benaben, F., Truptil, S., & Boissel-Dallier, N. (2019). A non-linear business process management maturity framework to apprehend future challenges. *International Journal of Information Management, 49*, 290-300.

[17] Gadatsch, A. (2023). *Business Process Management: Analysis, Modelling, Optimisation and Controlling of Processes*. 3ª edição. Editora Springer, 222p.

[18] Global Market Outlook. (2022). *Global Business Process Management Market Outlook 2017-2026*. Disponível em: https://www.globenewswire.com/news-release/2019/01/29/1707096/0/en/Global-Business-Process-Management-Market-Outlook-2017-2026-Market-is-Expected-to-Grow-at-a-CAGR-of-15-5.html. Acessado em: jul/24.

[19] Hellin, J., & Meijer, M. (2006). *Guidelines for value chain analysis, Food and Agriculture Organization* (FAO). UN Agricultural Development Economics.

[20] ISO – International Organization for Standardization. (2022). *ISO 9000 Family Quality Management. Popular Standards.* Disponível em: https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html. Acessado em: mai/24.

[21] ISO – International Organization for Standardization. (2015). *Norma Brasileira – ABNT ISO 9001:2015. Sistema de Gestão da Qualidade - Requisitos.* Disponível em: http://associacaodeinspetores.com.br/arquivos/arquivo_informativo/c2c76186249e40f1f5da5c8b09582702.pdf. Acessado em: jul/24.

[22] Kohlbacher, M. (2010). The effects of process orientation: a literature review. *Business process management journal, 16*(1), 135-152.

[23] Kumar, D., & Rajeev, P. V. (2016). Value chain: a conceptual framework. *International Journal of Engineering and Management Sciences, 7*(1), 74-77.

[24] Lamghari, Z., Radgui, M., Saidi, R., & Rahmani, M. D. (2018). A set of indicators for BPM life cycle improvement. *In 2018 international conference on intelligent systems and computer vision* (iscv) (pp. 1-8). IEEE.

[25] Mançu, R., Gouveia, L. B., & Cordeiro, S. (2019). Proposta de Integração dos Sistemas de Gestão ISO 9001: 2015, ISO 14001: 2015 e ISO 45001: 2018, com o Sistema de Gerenciamento de Segurança Operacional-SGSO da ANP. *V SIINTEC 2019. Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia.*

[26] Meidan, A., García-García, J. A., Escalona, M. J., & Ramos, I. (2017). A survey on business processes management suites. *Computer Standards & Interfaces, 51*, 71-86.

[27] Ong, F., Purwanto, A., Supono, J., Hasna, S., Novitasari, D., & Asbari, M. (2020). Does Quality Management System ISO 9001: 2015 Influence Company Performance? Anwers from Indonesian Tourism Industries. *Test Engineering & Management, 83*, 24808-24817.

[28] Ost, J. H., & Silveira, C. G. D. (2018). Avaliação do processo de transição da ISO 9001: 2008 para a ISO 9001: 2015: um estudo voltado para empresas químicas do Estado do Rio Grande do Sul. *Gestão & Produção, 25*, 726-736.

[29] Peirov, O. (2023). *Business process management as a tool for the improvement of import and export activities*. Master's Thesis in Economics and Management. Tomsk State University. Russian.

[30] Porter, M. E. (1989). *Vantagem competitiva: Criando e Sustentando um Desempenho Superior*. 1ª edição. Editora GEN Atlas, 536p.

[31] Robben, X., & Silva A. (2023). *A Cadeia de Valor de Michael Porter: Desbloqueie a vantagem competitiva da sua empresa*. Ebook. Editora 50Minutes.com, 33p.

[32] Rose, C. M., & Stevels, A. L. N. (2000). Applying environmental value chain analysis. *In A challenge for the next millennium, Berlin* (pp. 415-421). VDE.

[33] Rosita, L. (2022). Business Process Mapping in Entrepreneurial Unversities. *JATISI (Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi), 9*(3), 2438-2448.

[34] Silva, C. L. (2004). *Competitividade na cadeia de valor: um modelo econômico para a tomada de decisão empresarial*. 2ª edição. Editora Juruá, 182p.

[35] Szelągowski, M. (2017). *The Necessity of Redefining the Principles of Process Management.* Conference: Business and non-profit organization facing increased competition and growing customers' demands. At: Krakow, p. 1-16.

[36] Szelągowski, M., & Lupeikiene, A. (2020). Business process management systems: evolution and development trends. *Informatica, 3*1(3), 579-595.

[37] Teixeira, T. (2019). *Desvendando a cadeia de valor do cliente*. 1ª edição. Editora Alta Books, 352p.

[38] van der Aalst, W.M.P., ter Hofstede, A.H.M., Weske, M. (2003). Business Process Management: A Survey. In: *van der Aalst, W.M.P., Weske, M. (eds) Business Process Management. BPM 2003*. Lecture Notes in Computer Science, vol 2678. Springer, Berlin, Heidelberg.

[39] von Brocke, J., & Rosemann, M. (2015). *Handbook on Business Process Management, Strategic Alignment, Governance, People and Culture*. International handbooks on information systems, 1.

[40] vom Brocke, J., Zelt, S., & Schmiedel, T. (2016). On the role of context in business process management. *International Journal of Information Management, 36*(3), 486-495.

[41] Zairi, M. (1997). Business process management: a boundaryless approach tomodern competitiveness. *Business Process Management Journal, 3*(1), 64–80.

[42] Zamora, E. A. (2016). Value chain analysis: A brief review. *Asian Journal of Innovation and Policy, 5*(2), 116-128.

[43] Wicher, E. W. (2018). Avaliação da versão 2015 da Norma ISO 9001 - Um survey com profissionais de Gestão da Qualidade. *Gestão pela Qualidade, 3*, p.7.

# Autores

# AUTORES

## ALINE MARA OLIVEIRA (ORGANIZADORA)

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2012). Pós Graduada em Gestão de Projetos (FGV 2014-5015). Ministrou aulas no Centro Universitário do Planalto de Araxá(2015-2016) e no CEFET-MG nos cursos de graduação e técnicos. Tem experiência na área de Automação Industrial, Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: redes industriais, proteção de sistemas elétricos, IEC-61850, automação, instrumentação, sistemas de controle, equacionamento de controladores, sistemas multivariáveis e teoria de controle. Trabalhou na indústria no setor de projetos industrias no período de 2007 a 2015. Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia. (2017-2019). Atualmente doutoranda no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.(2019-2023)

## OSVALDO SENA GUIMARÃES (ORGANIZADOR)

Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1983), Ênfase em Engenharia de Transportes EEK (1983), Análise De Sistemas - UFMG(1985), Especialização em Gestão de Projetos de Engenharia IEC/PUC (2012), Mestrado em Estratégia FEAD (2005). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais (2015-2017 Divinópolis). Professor na Faculdade Senac Minas. Atua na área de ensino superior desde 1988 como Professor, Coordenador de Curso, Coordenador de Extensão, Coordenador de Iniciação Científica e de Pré-incubadora de base Tecnológica. Atua na área de Engenharia, Computação e Projetos desde 1984.

## ALESSANDRA SUZIN BERTAN

Natural de Clevelândia (PR), é doutoranda na Faculdade de Engenharia Química da Unicamp. Graduada em Engenharia Química pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Francisco Beltrão, mestra em Engenharia Química pela Unicamp. Possui experiência didática em Fenômenos de Transporte, e atua nas áreas de Ensino de Engenharia Química, Engenharia de Processos, Biosseparação e Transferência de Massa. Desenvolve pesquisas direcionadas à produção e recuperação de fármacos. Tem experiência em controle de qualidade e processos químicos em planta de etanol e de açúcar. Bertan foi agraciada com os prêmios em Desafio Tecnológico pela Agência de Inovação/Unicamp, e de melhores trabalhos no I Congresso Brasileiro Interdisciplinar de Ciência e Tecnologia e no II Web Encontro Nacional de Engenharia Química. É coautora dos livros Transferência de massa: difusão mássica em meios convencionais (indicado ao Prêmio Jabuti Acadêmico na categoria Engenharia) e Transferência de massa: difusão mássica em meios não convencionais, ambos publicados pela Editora Blucher. Tem trabalhos publicados em capítulos de livros, revistas especializadas, anais de congresso, e possui quatro depósitos de patente e dois registros de softwares junto ao Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (INPI).

## ANDERSON DE OLIVEIRA CASTRO CORREIA

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Ciências e Tecnologia da Bahia - Campus Vitória da Conquista.

## ANTONIO SÉRGIO BREJÃO

Docente - Universidade São Judas Tadeu

## CESAR HENRIQUE ROCHA SILVEIRA

Mestrando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Especialista em Metodologia de Ensino de Matemática, Graduado em Licenciatura Plena em Matemática e Técnico de nível médio nos cursos de Eletrotécnica, Eletromecânica e Mecânica.

AUTORES

## CLÁUDIO JÚNIOR NEVES SOUSA

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Ciências e Tecnologia da Bahia - Campus Vitória da Conquista.

## EDUARDO SOUSA SOARES

Engenharia de Controle e Automação - Universidade São Judas Tadeu

## ELISA HENNING

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade do Estado de Santa Catarina (1992), mestrado em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (1998), especialização em Matemática e Estatística (UFLA), mestrado em Estatística pela Universidade Aberta de Portugal (2014) e doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (2010). Atualmente é professor efetivo da Universidade do Estado de Santa Catarina. Desenvolve pesquisa na área de Estatística Aplicada à Engenharia, nomeadamente ao Desenvolvimento Sustentável na Construção Civil e Métodos Estatísticos para a Pesquisa em Educação.

## GABRIEL SAQUETE DOS SANTOS

Engenharia de Controle e Automação - Universidade São Judas Tadeu

## JOÃO ERCIO MIRANDA JÚNIOR

Doutor em Engenharia Mecânica

## KAREN CRISTINA RIBEIRO SARANDY

Graduanda em Engenharia Química

## LEANDRO ZVIRTES

Graduação em Química Industrial pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM - 1999), Mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS - 2002) e Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS - 2022). Professor adjunto da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) no curso de Engenharia de Produção e Sistemas. Possui experiência na área de Engenharia de Produção e Administração Universitária, com ênfase nas áreas de Gestão da Qualidade, Gerenciamento de processos e serviços. Na UDESC, já exerceu várias funções administrativas, entre elas Coordenador de Curso, Chefe de Departamento, Diretor de Administração, Diretor Geral, Pró-Reitor de Planejamento e Vice Reitor.

## LUCIANO TRENTIN

Doutor em Ciências Contábeis e Administração pela Fundação Universidade Regional de Blumenau - FURB

## MARCO AURÉLIO CREMASCO

Professor Titular em Engenharia Química e Livre Docente em Transferência de Massa, o Prof. Marco Cremasco possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá, mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), pós doutorado em Engenharia Química (Purdue University-EUA). Foi agraciado, em 2012, com o Prêmio de Reconhecimento Docente pela Dedicação ao Ensino de Graduação, pela Unicamp. Em 2017, 2019, e

AUTORES

2021 recebeu o Prêmio Inventores Unicamp. Possui publicados os livros: Fundamentos de transferência de massa; Vale a pena estudar engenharia química; Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos; Difusão mássica; Transferência de massa: difusão em meios convencionais (Blucher; Indicação ao Prêmio Jabuti Acadêmico - Categoria: Engenharias); Transferência de massa: difusão em meios não convencionais (Blucher); A criação (Livro Aberto); As coisas de João Flores; Bilros (Patuá); Onde se amarra a terra vermelha (Nave Editora, indicado ao Prêmio Jabuti); Viagens necessárias (Tao); Histórias prováveis (Record); Santo Reis da Luz Divina (Record, indicado ao Prêmio Jabuti), Guayrá, A solidão dos anjos e Wilde, uma peça (Confraria do Vento), bem como pouco mais de trezentos e cinquenta trabalhos completos publicados em capítulos de livros, revistas especializadas e anais de congressos; quatro patentes concedidas, solicitação de outras seis e registro de dois softwares junto ao INPI. Tem experiência em campos de Engenharia Química, com ênfase em Transferência de Massa, Engenharia de Processos, Biosseparação e Sistemas Particulados. Atualmente é assessor na Pró-Reitoria de Extensão, Esporte e Cultura da Unicamp, faz parte do Conselho Editorial da Blucher (SP) e da Editora da Unicamp.

## MAURO DONIZETI BERNI

Engenheiro de Produção e Química pela Universidade Federal de São Carlos. Especialização em Análise de Sistemas, Gestão Ambiental e Sustentabilidade. Bacharel em Ciências Jurídicas. Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos pela Universidade Estadual de Campinas. Trabalhou por 25 anos nos setores de celulose e papel, cerâmico e de alimentos e bebidas na produção, planejamento e utilidades. Pesquisador associado do Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE) da UNICAMP desde 19/07/2010. Experiência em Planejamento Energético, Eficiência Energética, Bioenergia e Bioeconomia. Desenvolve atividades acadêmicas de orientação, pesquisa e desenvolvimento envolvendo Planejamento Energético, Sustentabilidade, Regulação, Gestão Integrada de Energia e Água, Modelagem matemática, Otimização e Economia Circular. Entre 2016 e 2019 participou do Conselho Estadual de Política Energética do Estado de São Paulo (CEPE). Facilitador do Grupo Gestor Universidade Sustentável, COCEN/NIPE, GGUS-UNICAMP, signatário do / GULF Carta ISCN. Atua no aproveitamento energético e sustentabilidade ambiental em temas relativos a transição energética, com ênfase no conceito integrado de Biorrefinarias.

## MOACIR MARQUES

Mestre em Engenharia de Transporte e Gestão Territorial pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

## OLGA MARIA FORMIGONI CARVALHO WALTER

Doutora (2020) e Mestre (2012) em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Engenheira de Produção e Sistemas (2007) pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Atualmente é professora colaboradora da Universidade do Estado de Santa Catarina no Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas do Centro de Ciências Tecnológicas de Joinville/SC. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, com ênfase em Métodos Estatísticos para Qualidade e Lean Seis Sigma.

## PAULO CESAR MANDUCA

Doutor em Sociologia das Relações Internacionais pela USP. Foi pesquisador do Nucleo de Estudos Estratégicos. Atualmente é pesquisador do NIPE da Unicamp em temas relacionados a geopolítica da energia.

## RAFAEL DE PAULA LACERDA PIO

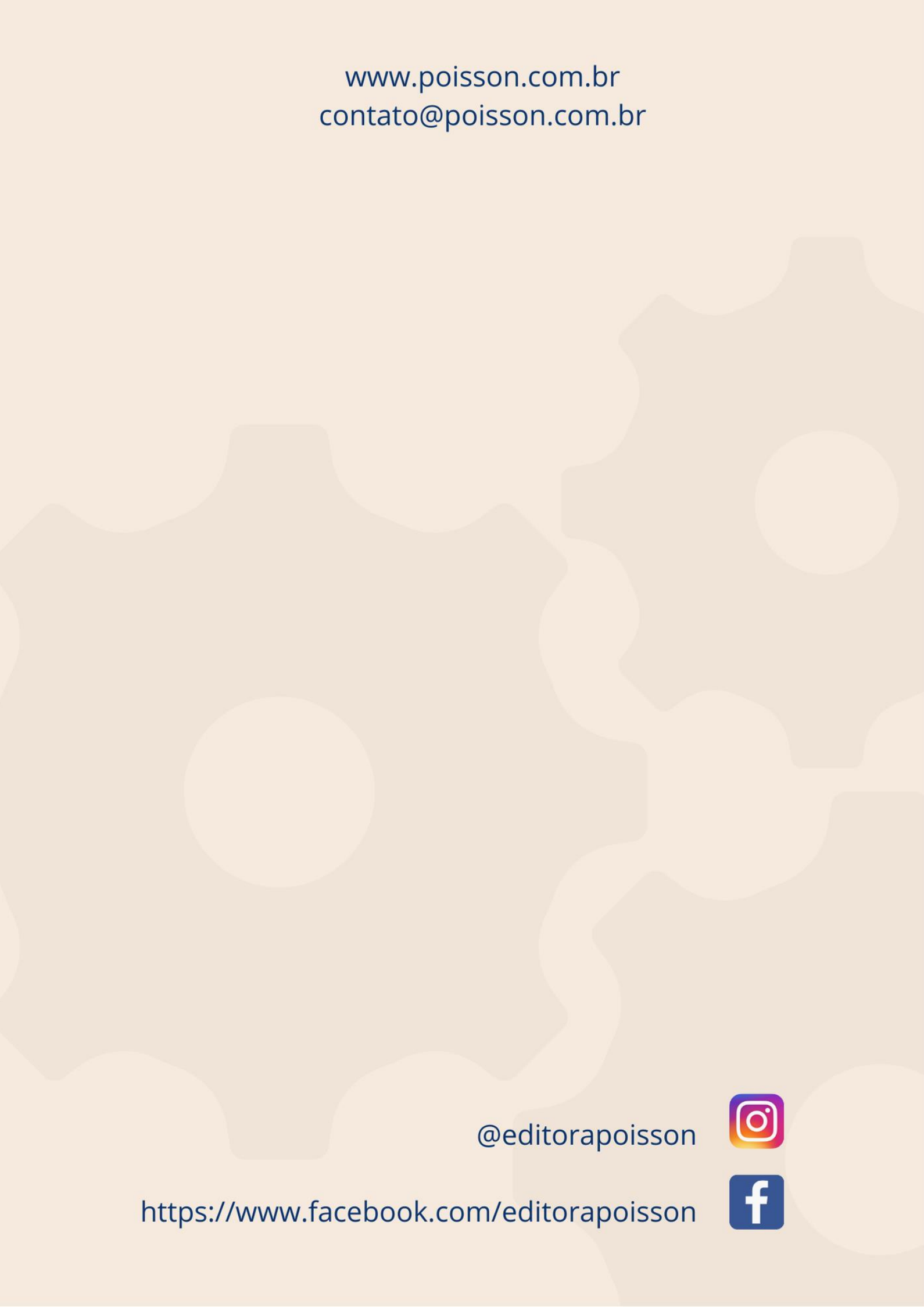
Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Ciências e Tecnologia da Bahia - Campus Vitória da Conquista.

AUTORES

## RAFAEL MENEZES NUNES

Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2006), mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul com período sanduíche na Universität Bremen(2008). Fez doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul com período sanduíche na Universität Bremen(2012) atuando em processos de Conformação Mecânica e engenharia de distorção. Atualmente é professor Adjunto da UFRGS e Diretor do Centro de Tecnologia. É professor Colaborador e orientador de Mestrado e Doutorado no PPGE3M - UFRGS. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, controle de tensões residuais em processos de fabricação. É pesquisador nos seguintes temas: Processos de Conformação mecânica, em especial: trefilação, Metalurgia do Pó, Estampagem, tensões residuais, controle de distorção e empenamento, engenharia de superfícies, controle e caracterização de tensões residuais, fases e textura por difração de raios-X, difração de nêutrons, método do furo cego (hole-drilling)

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br



@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson